

Entwicklung eines Konzepts zur Auswahl geeigneter Validierungsmethoden für Tech- nologiebewertungsverfahren am Beispiel der Batteriezellproduktion

Masterarbeit zur Erlangung des akademischen Grades Master of Science
(M. Sc.)

Vorgelegt von:	Vincent Gross
Matrikelnummer:	212622
Studiengang:	Wirtschaftsingenieurwesen
Ausgabedatum:	31.10.2023
Abgabedatum:	29.04.2024
Erstprüfer/-in:	Dr.-Ing Dipl.-Inform. Anne Antonia Scheideler
Zweitprüfer/-in:	Katharina Langenbach, M. Sc.

Technische Universität Dortmund
Fakultät Maschinenbau
Fachgebiet IT in Produktion und Logistik

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	V
Abkürzungsverzeichnis	VI
Formelverzeichnis.....	VII
1 Einleitung.....	1
2 Grundlagen der Technologiebewertung	4
2.1 Ziele und Nutzen der Technologiebewertung.....	5
2.2 Ansätze der Technologiebewertung.....	7
2.3 Kriterien für die Bewertung von Produktionstechnologien	16
2.4 Technologiebewertung in der Batteriezellproduktion.....	28
3 Grundlagen der Validierung	30
3.1 Validierung von Modellen.....	30
3.1.1 Kriterien für Validierung	31
3.1.2 Arten von Validierung	34
3.2 Validierung im Kontext der Technologiebewertung	39
4 Methodisches Vorgehen in der Arbeit	42
4.1 Durchführung der systematischen Literaturrecherche.....	44
4.2 Gegenüberstellung und Einordnung der Literaturlauswertung	50
5 Konzeptionelles Vorgehen	60
5.1 Anforderungen des Konzepts	60
5.2 Randbedingungen des Konzepts.....	61
6 Konzeptionierung der Entscheidungsunterstützung	62
6.1 Beschreibung des Ablaufschemas.....	63
6.2 Ermittlung der Abhängigkeiten.....	69
6.2.1 Ressourcenanforderungen der Validierungsmethoden	69
6.2.2 Zusammenhang von Technologiebewertungsverfahren und Methoden der Validierung.....	74
6.3 Beschreibung und Darstellung des Gesamtkonzepts.....	93
7 Exemplarische Anwendung der Entscheidungsunterstützung.....	97
7.1 Vorstellung des Fallbeispiels	97
7.2 Anwendung der entwickelten Entscheidungsunterstützung.....	100

7.3	Diskussion und Fazit.....	107
8	Zusammenfassung und Ausblick	113
	Literaturverzeichnis.....	117
	Anhang	125
	Anhang A: Literaturlauswertung Web of Science	125
	Anhang B: Literaturlauswertung Google Scholar.....	127
	Anhang C: Auflistung der Validierungsgruppen	131
	Anhang D: Ausprägungen der Validierungsgruppen.....	132
	Anhang E: Unterlagen zum Experteninterview	137
	Eidesstattliche Versicherung.....	139

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Mindmap Technologiebewertung	5
Abbildung 2: Auswahlentscheidung einer Technologie	6
Abbildung 3: Mehrstufiger Prozess der Technologiebewertung.....	6
Abbildung 4: Technologiemanagement-Prozess	8
Abbildung 5: Technologiebewertung im Kontext des Technologiemanagementprozesses...	11
Abbildung 6: Unterstützende Verfahren in der Technologiebewertung	12
Abbildung 7: Technologiebewertung in der Technologiefrüherkennung	13
Abbildung 8: Technologielebenszyklus	14
Abbildung 9: Darstellung des Zusammenwirkens einzelner Aspekte zur Bewertung	18
Abbildung 10: Transformationsprozess durch eine Technologie zur Leistungserstellung	19
Abbildung 11: Methode zur Bestimmung der Wirtschaftlichkeit	20
Abbildung 12: Methode zur Bestimmung der technischen Machbarkeit	21
Abbildung 13: Technologielebenszyklus und enthaltene Entwicklungsstufen	22
Abbildung 14: TRL-Skala	22
Abbildung 15: Beispielhafte Darstellung eines Reife-Profiles	24
Abbildung 16: Fiktiver Programmplan mit eingebundenen TRAs	25
Abbildung 17: Konzeptionelles Vorgehen zur Bestimmung des Technologiepotentials	26
Abbildung 18: Bewertungskriterien für das Leistungspotential	27
Abbildung 19: Herstellungsprozess einer Batteriezelle.....	28
Abbildung 20: Rahmen zur Verbesserung der Validität eines Bewertungsmodells	32
Abbildung 21: Der Modellvalidierungsprozess	35
Abbildung 22: Vorgehen zur systematischen Literaturrecherche.....	42
Abbildung 23: Darstellung des methodischen Vorgehens in der Arbeit	44
Abbildung 24: Prozess zur systematischen Bewertung der Literatur	50
Abbildung 25: Gruppen von Validierungsmethoden	52
Abbildung 26: Validierungsziele	66
Abbildung 27: Ablaufschema zur Auswahl einer geeigneten Validierungsmethode.....	68
Abbildung 28: Morphologischer Kasten für den Auswahlschritt Charakteristika.....	93
Abbildung 29: Vollständiger morphologischer Kasten für das Konzept.....	95
Abbildung 30: Technologiebewertungsverfahren	97
Abbildung 31: Potential-Wirtschaftlichkeits-Portfolio	99
Abbildung 32: Auswertung des morphologischen Kastens anhand des Fallbeispiels	103
Abbildung 33: Auswertungsergebnisse des morphologischen Kastens	107

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Merkmale zur Klassifikation von Kriterien	17
Tabelle 2: Suchbegriffe (deutsch) für die Literaturrecherche	46
Tabelle 3: Suchbegriffe (englisch) für die Literaturrecherche	46
Tabelle 4: Vollständige Start-Suchkette mit englischen Suchbegriffen für Web of Science ..	47
Tabelle 5: Finale Suchbegriffe für die Literaturrecherche	48
Tabelle 6: Suchfelder in den Datenbanken	48
Tabelle 7: Finale Suchkette für Web of Science.....	48
Tabelle 8: Beispielhafte Suchketten für die Datenbank Google Scholar	49
Tabelle 9: Ausgehendes Problem des Konzepts.....	63
Tabelle 10: Beispiel einer Bewertungsmetrik für Daten	64
Tabelle 11: Zweiter Aspekt des Konzepts	65
Tabelle 12: Dritter Aspekt des Konzepts	65
Tabelle 13: Vierter Aspekt des Konzepts	67
Tabelle 14: Fünfter Aspekt des Konzepts	68
Tabelle 15: Sechster Aspekt des Konzepts.....	68
Tabelle 16: Siebter Aspekt des Konzepts.....	68
Tabelle 17: Datenanforderungen der Validierungsgruppen	71
Tabelle 18: Zeitaufwand der Validierungsgruppen	72
Tabelle 19: Finanzielle Anforderung der Validierungsgruppen	74
Tabelle 20: Erstes Charakteristikum für den morphologischen Kasten.....	76
Tabelle 21: Eignung der Validierungsmethoden für verschiedene Bewertungsziele	81
Tabelle 22: Zweites Charakteristikum für den morphologischen Kasten.....	82
Tabelle 23: Drittes Charakteristikum für den morphologischen Kasten	84
Tabelle 24: Eignung der Validierungsmethoden für verschiedene Unsicherheiten	87
Tabelle 25: Viertes Charakteristikum für den morphologischen Kasten.....	88
Tabelle 26: Fünftes und sechstes Charakteristikum für den morphologischen Kasten	90
Tabelle 27: Siebtes Charakteristikum für den morphologischen Kasten	92
Tabelle 28: Einschätzung der Ressourcen Daten, Zeit und Finanzen	94
Tabelle 29: Beschreibung der Vorgehensweise bei Anwendung des Ablaufschemas	96
Tabelle 30: Einschätzung der Ausprägungen der Ressourcen am Fallbeispiel	102

Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
bzw.	beziehungsweise
d. h.	das heißt
FFB	Forschungsfertigung Batteriezelle
IWS	Institut für Werkstoff- und Lasertechnik
MECE	Mutually Exclusive and Collectively Exhaustive
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NPV	Net Present Value
ROI	Return of Investment
Tab.	Tabelle
TRA	Technology Readiness Assessment
TRL	Technology Readiness Level
TLZ	Technologielebenszyklus
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
vgl.	vergleiche
V&V	Verifikation und Validierung
u. a.	unter anderem
z. B.	zum Beispiel

Formelverzeichnis

A_t	Summe der Auszahlungen
b_i	Bewertung
E_t	Summe der Einzahlungen
$g_{1,i}$	Gewichtung der Hauptgruppe
$g_{2,i}$	Gewichtung der Untergruppe
$g_{3,i}$	Gewichtung des einzelnen Kriteriums
i	Kriterium
i_{NPV}	Kalkulationszinssatz
κ_p	Kapitalwert
NPV	Kapitalwert
T	Betrachtungsperiode
w	Wert
$\mu_{\varphi p}$	Erwartungswert des Technologiepotentials
$\sigma_{\varphi p}$	Standardabweichung des Leistungspotentials
φ_p	Technologiepotential

1 Einleitung

Technologischer Fortschritt ist eine Schlüsselrolle für wirtschaftlichen Erfolg in der heutigen Zeit (Goehrmann 2020). Aufgrund der Dynamik und der Vielfalt technologischer Entwicklungen ist es für Unternehmen von großer Wichtigkeit, sich dauerhaft und umfassend mit den aktuellen Trends, Folgen und Potentialen von Technologien auseinanderzusetzen (Klappert et al. 2010). Die Wahl einer geeigneten Technologie für einen spezifischen Anwendungsbereich ist von entscheidender Bedeutung, um den Marktdynamiken gerecht zu werden und Wettbewerbsvorteile zu erlangen (Hall 2002). Für die Erlangung von entscheidungsgestütztem Wissen zur Auswahl einer Technologie ist es unerlässlich, ein geeignetes Verfahren zur Bewertung von Technologien sorgfältig auszuwählen (Banta 2009). Technologiebewertung bezeichnet die Ermittlung und Beurteilung der Eignung einer Technologie z. B. für eine Produktionslinie anhand unterschiedlicher Kriterien und dient somit als Informationsgrundlage in unterschiedlichen Entscheidungssituationen über die Entwicklung, Einführung und Nutzung von Technologien (Haag et al. 2010). Die Technologieplanung der letzten Jahre hat Unternehmen aufgrund der Anzahl, Art, Komplexität und Dynamik der Technologieentwicklungen hohen Anforderungen und Problemstellungen wie beispielsweise der Schaffung einer flexiblen Infrastruktur zur Integration neuer Technologien gegenübergestellt (Orilski et al. 2010). Die Bewertung von Technologien wird somit aufgrund der Unsicherheit zukünftiger Entwicklungen erschwert (Hennen et al. 2023).

In der Literatur existieren eine Vielzahl von Verfahren zur Technologiebewertung, wobei viele dieser Verfahren unerprobt sind (Haag et al. 2010). Die mangelnde Erprobung von Technologiebewertungsverfahren resultiert aus der raschen Evolution und Komplexität technologischer Entwicklungen, die es schwierig macht, etablierte und standardisierte Bewertungsverfahren zu entwickeln (Klappert et al. 2010). Angesichts der Vielzahl von Technologiebewertungsverfahren und der Unerprobtheit dieser Verfahren besteht ein dringender Bedarf an einer sorgfältigen Validierung der Verfahren (Carson 2002; Hall 2002; Rabe et al. 2008; Haag et al. 2010). Bei der Validierung handelt es sich um einen prozessorientierten, systematischen und dokumentierten Ansatz zur Bewertung und Gewährleistung, dass ein System, Prozess, Produkt oder ein Verfahren die spezifizierten Anforderungen und festgelegten Ziele in einem vorgegebenen Kontext erfüllt (Rabe et al. 2008). Dadurch werden die Zuverlässigkeit und Effektivität sichergestellt und Inkonsistenzen und Unsicherheiten, die die Qualität der Entscheidungsfindung beeinträchtigen, verringert (Haag et al. 2010). Aufgrund dessen ist die Validierung von Technologiebewertungsverfahren wichtig zur Verbesserung der Qualität, Effizienz und Glaubwürdigkeit des Bewertungsprozesses (Borsboom et al. 2004). Dies unterstützt Unternehmen fundierte Entscheidungen zu treffen, die ihre langfristige Wettbewerbsfähigkeit stärken (Yin und McKay 2018).

Bei Betrachtung der Literatur zum Thema Methoden der Validierung wird häufig die Verifikation und Validierung (V&V) von Modellen als wesentlicher Aspekt betrachtet, um glaubwürdige und aussagekräftige Ergebnisse zu erzielen (Rabe et al. 2008; Carson 2002; Balci 1997). In diesem Kontext umfasst Validierung die Überprüfung der ausreichenden Genauigkeit eines

Modells bei der Approximation eines realen oder zu untersuchenden Systems (Carson 2002). Dies lässt sich zusammenfassen durch die Fragestellung, ob ein angemessenes Modell erstellt wurde (Rabe et al. 2008). Hierfür existieren verschiedene V&V-Techniken, die je nach Anwendungsfall verschiedene Anforderungen an Datengrundlage, Durchführung und Interpretation der Ergebnisse von Modellen stellen (Brade 2000; Balci 1997).

Aufgrund der hohen Komplexität und Dynamik in der Bewertung von Technologien sowie der Wichtigkeit einer sorgfältigen Validierung stehen Unternehmen vor der Herausforderung geeignete Verfahren für spezifische Kontexte selbst zu entwickeln oder auszuwählen. Unternehmen bedienen sich in diesem Zusammenhang verschiedener Ansätze der Technologiebewertung und entwickeln daraus ihr eigenes Technologiebewertungsverfahren (Brandkamp 2000). Zur Bestimmung der Eignung des entwickelten Technologiebewertungsverfahrens wird anschließend eine Methode der Validierung angewendet (Haag et al. 2010) Die Auswahl einer Validierungsmethode stellt sich aufgrund der fehlenden Expertise über die verschiedenen Methoden sowie der Vielzahl und Komplexität der einzelnen Methoden oftmals als problematisch dar (Wojcicki und Strooper 2007; Balci et al. 2002; Wang 2013).

Eine mögliche Herangehensweise, um diesen Herausforderungen zu begegnen, besteht in einer intensiven Betrachtung der Zusammenhänge zwischen Technologiebewertungsverfahren und Validierungsmethoden. Durch die Betrachtung der Zusammenhänge kann eine Grundlage zur entscheidenden Unterstützung bei der Auswahl einer Validierungsmethode sowie der Verbesserung von Technologiebewertungsverfahren geschaffen werden. Zur Realisierung der Entscheidungsunterstützung müssen zunächst geeignete Validierungsmethoden charakterisiert werden. Darüber hinaus müssen als Zusammenhang Kriterien von Technologiebewertungsverfahren herausgearbeitet werden, die bei der Entscheidungsunterstützung betrachtet werden.

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Konzepts zur Auswahl geeigneter Validierungsmethoden für Technologiebewertungsverfahren mit Hilfe von abgeleiteten Kriterien. Um dies zu erreichen sind die Zwischenziele, Kriterien von Technologiebewertungsverfahren und Eigenschaften von Validierungsmethoden zu erarbeiten. Basierend darauf kann ein Abgleich zwischen den Kriterien und den Eigenschaften erfolgen sowie die Zwischenziele zusammengeführt werden. Aus diesen Teilzielen können Gestaltungsparameter für das Konzept der Entscheidungsunterstützung abgeleitet werden.

Zum Ableiten von Kriterien von Technologiebewertungsverfahren und der Eigenschaften von Validierungsmethoden müssen zunächst Grundlagen der Technologiebewertung und Validierung erarbeitet werden. Bei den Grundlagen der Technologiebewertung werden zunächst Ziele und Nutzen der Technologiebewertung herausgestellt. Darüber hinaus müssen insbesondere verschiedene Ansätze sowie Anforderungen und Eigenschaften von Technologiebewertungsverfahren basierend auf etablierter Literatur herausgestellt werden, um im späteren Verlauf Rückschlüsse auf geeignete Kriterien ziehen zu können. Im letzten Abschnitt des Kapitels wird spezifisch auf die Technologiebewertung in der Batteriezellproduktion eingegangen. Ein ähnliches Vorgehen ist für die Analyse der Validierungsmethoden notwendig. Dazu zählt u. a. ein Überblick über Kriterien für Validierung sowie die Betrachtung verschiedener Arten von

Validierung für das Verständnis des zu entwickelnden Konzepts. Anschließend wird auf Validierung im Kontext von Technologiebewertung eingegangen, um den Bezug zwischen den Themengebieten aufzuzeigen. Nachdem diese Schritte erfolgt sind, wird eine systematische Literaturrecherche durchgeführt. Anhand etablierter Literatur werden geeignete Validierungsmethoden ausgewählt, die dem Konzept als Auswahl von Methoden zugeordnet werden. Zur Nutzung dieser werden für eine fundierte Entscheidungsunterstützung verschiedene Ansätze zur Auswahl von Validierungsmethoden anhand von ausgewählten Kriterien untersucht und miteinander verglichen. Basierend auf der Literaturrecherche wird das Konzept der Entscheidungsunterstützung entwickelt, indem in einem ersten Schritt Anforderungen und Randbedingungen des Konzepts formuliert werden. Anschließend wird der Bezug zwischen Validierungsmethoden und Kriterien der Technologiebewertungsverfahren hergestellt. Darauf aufbauend erfolgen die Entwicklung der Gestaltungsparameter sowie die Erstellung des Gesamtkonzepts. Das Konzept wird abschließend exemplarisch an einem Technologiebewertungsverfahren angewendet und validiert. In diesem Kontext geht es zudem darum das Konzept der Entscheidungsunterstützung kritisch zu hinterfragen, um Anhaltspunkte zu identifizieren, die es ermöglichen, das Konzept weiterzuentwickeln und zu verbessern.

2 Grundlagen der Technologiebewertung

In diesem Kapitel werden die theoretischen Grundlagen zur Technologiebewertung aufgearbeitet. Aufbauend auf den Zielen und Nutzen der Technologiebewertung werden verschiedene Ansätze der Technologiebewertung dargestellt. Im Abschnitt Kriterien für die Bewertung von Produktionstechnologien werden Kriterien betrachtet und anschließend die Technologiebewertung in Bezug auf die Batteriezellproduktion herausgearbeitet und erläutert.

Zur Einführung in das Themengebiet der Technologiebewertung werden zunächst begriffliche Grundlagen erläutert. Technologie wird definiert als die Wissenschaft oder Wissen, welche zu einem spezifizierten Zweck angewendet wird (Banta 2009). Präzise ausgedrückt bezieht sich Technologie auf die Anwendung von wissenschaftlichem Wissen. Dieses wird zur Entwicklung, Herstellung und Nutzung von Werkzeugen, Maschinen, Systemen, Geräten oder Verfahren, um praktische Probleme zu lösen, Bedürfnisse zu befriedigen oder Ziele zu erreichen genutzt (Banta 2009). Eine weitere Definition ist die Anwendung von Wissen über naturwissenschaftliche und technische Wirkzusammenhänge, die zur Lösungsfindung für technische Probleme genutzt werden können und sich dadurch in Produkten und Verfahren niederschlagen (Wolfrum 1991). Diese funktionale Definition verdeutlicht die ökonomische Aufgabe von Technologien, nämlich die Schaffung der notwendigen Elemente für die wirtschaftliche Herstellung effizienter Produkte und Produktionsprozesse (Zahn 1995). Der Begriff Bewertung, bekannt als Evaluation, wird in der Literatur unterschiedlich definiert (Kotte 2017; Haag et al. 2010; Specht und Möhrle 2002). In Bezug auf Technologien wird darunter die Bewertung einer Technologie anhand verschiedener Kriterien in unterschiedlichen Entscheidungssituationen verstanden (Haag et al. 2010). Die Bewertung von Technologien ist von großer Bedeutung für Unternehmen, da die Beurteilung einer neuen Technologie sich auf die Wettbewerbsposition auswirken kann (Wolfrum 1991). Eine zielgeführte Bewertung geeigneter Technologien kann den Nutzen einer Technologie für Unternehmen erhöhen und die Leistungserbringung steigern, wodurch eine Marktdifferenzierung von Wettbewerbern stattfindet (Gochermann 2020). Technologie bildet somit eine wichtige strategische Ressource, die zur Erhaltung und Verbesserung von Wettbewerbspositionen beiträgt. Unternehmen bauen ihre strategische Position in diesem Zusammenhang häufig auf Technologien auf, die sich in der Branche etabliert haben (Moll et al. 2010).

Die Technologiebewertung nimmt eine Querschnittsfunktion innerhalb des Technologiemanagements ein und bildet einen wesentlichen Bestandteil der Technologieplanung (Haag et al. 2010). Das Technologiemanagement steuert die Generierung von neuem Wissen aus internen und externen Quellen unter Nutzung von vorhandenem Wissen und weiteren Produktionsfaktoren in einem kontrollierbaren Vorgehen (Bullinger und Renz 2005). In diesem Kontext stellt die Technologiebewertung eine entscheidende Voraussetzung für die effiziente und effektive Gestaltung des Technologiemanagements dar, indem die Entscheidungsfindung unterstützt wird (Haag et al. 2010; Bullinger und Renz 2005). Eine Hauptaufgabe der strategischen Technologieplanung besteht in der Ideengenerierung über den Einsatz sowie der Analyse und Auswahl von Technologien (Orilski et al. 2010). Hierbei unterstützt die Technologiebewertung,

insbesondere Fragen bei der Analyse und Auswahl von Technologien (Haag et al. 2010). Diese werden mit den Ansätzen der Technologiebewertung beantwortet (Specht und Möhrle 2002). Abbildung 1 veranschaulicht die genannten Zusammenhänge zwischen Technologiebewertung, Technologiemanagement und Technologieplanung.

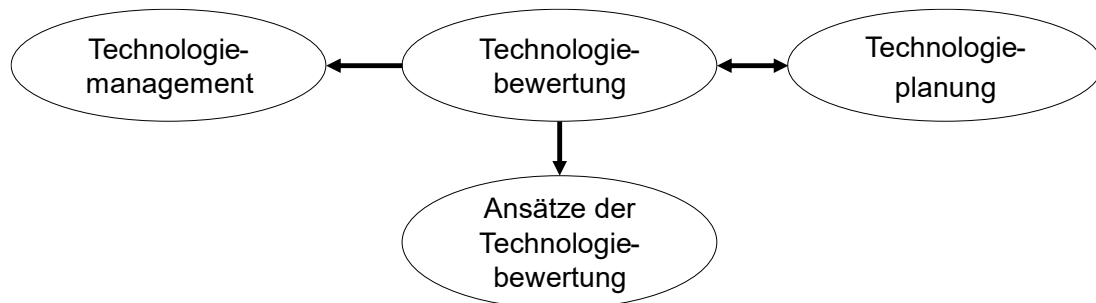


Abbildung 1: Mindmap Technologiebewertung in Anlehnung an Specht und Mieke (2018)

Die Technologiebewertung ist hierbei als Bestandteil des Technologiemanagements und in einer gegenseitigen Abhängigkeit mit der Technologieplanung dargestellt, wobei verschiedene Ansätze zur Anwendung kommen. Bei den Ansätzen zur Technologiebewertung handelt es sich um spezifische wissenschaftliche Methoden der Erkenntnisgewinnung (Haag et al. 2010). Sie bilden die Grundlage für die Erarbeitung der Technologieplanung bzw. -strategie in Unternehmen (Schubert et al. 2010). Dazu zählen u. a. Verfahren zur Vorausschau der Entwicklung einer Technologie sowie die Beurteilung einer Technologie anhand verschiedener Zielkriterien (Specht und Möhrle 2002).

In der Literatur bildet die Technologiebewertung ein breites Feld (Hennen et al. 2023). Bei Betrachtung früher Studien des Begriffes Technologiebewertung wurde dieser als eine Form der Politikforschung zur Untersuchung der kurz- bzw. langfristigen Folgen (z. B. gesellschaftlich, wirtschaftlich, ethisch) der Anwendung von Technologien genutzt (Banta 2009). In diesem Zusammenhang war es das Ziel der Technologiebewertung, Entscheidungsträgern der Politik Informationen über politische Alternativen zu liefern (Banta 2009). In dieser Arbeit wird der Fokus auf die Bewertung von Produktionstechnologien gesetzt, da diese die relevanten Technologien für die späteren Untersuchungen darstellen. Die Produktionstechnologie bezieht sich auf das systematische Anwenden von wissenschaftlichen und technischen Prinzipien, Methoden und Verfahren zur Umwandlung von Rohstoffen oder Komponenten in fertige Produkte (Schubert et al. 2010). Diese ist zu unterscheiden von der Produkttechnologie, welche sich auf die Erfüllung einer Aufgabenstellung für das Endprodukt spezialisiert (Schubert et al. 2010).

Im nächsten Abschnitt werden die wesentlichen Ziele und Nutzen der Technologiebewertung von Produktionstechnologien dargestellt und weiter vertieft. Dafür wird in einem ersten Schritt ein Vorgehen bei der Technologiebewertung vorgestellt.

2.1 Ziele und Nutzen der Technologiebewertung

Die Technologiebewertung ist ein entscheidendes Instrument im modernen Innovationsmanagement, welches darauf abzielt, die Effektivität und Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen zu steigern (Hennen et al. 2023). Durch eine systematische Informationsanalyse und der

Betrachtung der Marktbedürfnisse können potentielle, transformative Technologien erkannt und die Wettbewerbsposition eines Unternehmens gestärkt werden (Haag et al. 2010). Die Auswahlentscheidung einer Technologie ist eine logische Abfolge von Schritten, die in Abbildung 2 schematisch dargestellt ist (Granig 2013).

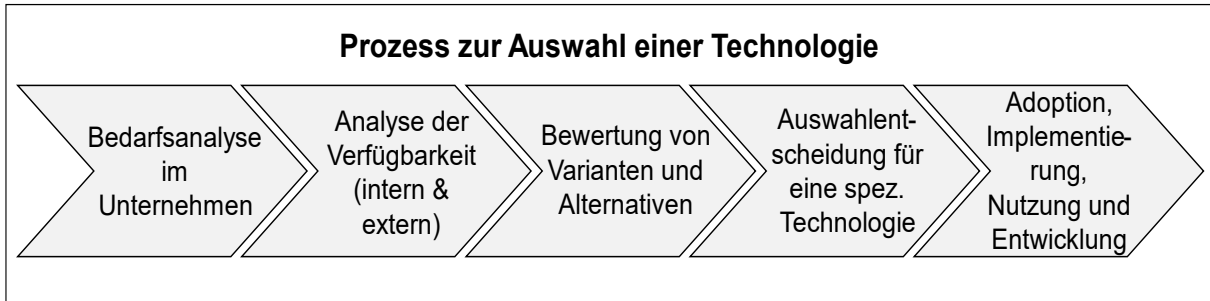


Abbildung 2: Auswahlentscheidung einer Technologie in Anlehnung an Granig (2013, S. 211)

Der Prozess beginnt mit einer Bedarfsanalyse im Unternehmen (vgl. Abb. 2). In diesem Zusammenhang können alle vorhandenen Technologien genutzt werden, die im spezifischen Kontext eines Unternehmens als potentielle Technologien eingestuft werden, um zur Technologieauswahl/-bewertung beizutragen (Granig 2013). Die Technologiebewertung folgt hierbei auf die Analyse der internen und externen Technologieverfügbarkeit (vgl. Abb. 2). Zur Verdeutlichung des mehrstufigen Prozesses der Technologiebewertung zur Technologieauswahl, ist dieser in Abbildung 3 dargestellt.

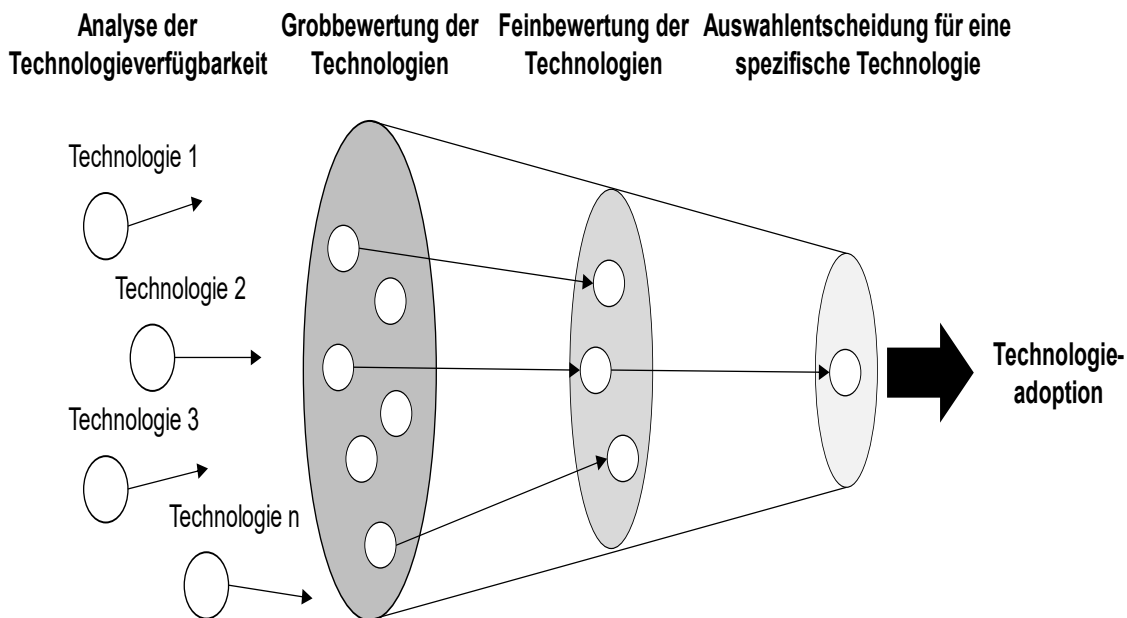


Abbildung 3: Mehrstufiger Prozess der Technologiebewertung in Anlehnung an Granig (2013, S. 211)

Den Ausgangspunkt bilden eine Vielzahl von Technologien, die eine Grobbewertung und anschließend eine Feinbewertung durchlaufen, bevor sich in einem Auswahlprozess für eine spezifische Technologie entschieden wird (vgl. Abb. 3). Bei der Grobbewertung werden geeignete Technologien aus den potentiellen Technologien vorgefiltert (Granig 2013). In der

folgenden Feinbewertung werden für das Unternehmen Technologien herausgefiltert, die den Anforderungen des Unternehmens, beispielsweise hinsichtlich der Leistung und Kosten, besonders entsprechen (Granig 2013). Eines der Hauptziele der Technologiebewertung besteht folglich darin, vielversprechende technologische Entwicklungen und eine für das Unternehmen geeignete Technologie zu identifizieren (Specht und Möhrle 2002). Ein weiteres Ziel ist die Risikoreduktion durch Technologiebewertung (Haag et al. 2010). Die Technologiebewertung ermöglicht es, Unsicherheiten und Risiken im Zusammenhang mit der Einführung neuer Technologien zu minimieren (Grunwald 2009). Dies trägt dazu bei fundierte Entscheidungen in Bezug auf Investitionen und Entwicklungsrichtungen zu treffen, indem potentielle Herausforderungen frühzeitig erkannt und bewertet werden (Alber und Gassmann 2005). Somit fungiert die Technologiebewertung als Entscheidungsunterstützung bei wichtigen Entscheidungsprozessen wie zum Beispiel bei Ja- oder Nein-Entscheidungen (Brodbeck 1999). Durch die gezielte Bewertung von Technologien können Unternehmen ihre Forschungs- und Entwicklungsprozesse optimieren (Banta 2009). Dies beinhaltet die Priorisierung vielversprechender Projekte, die effiziente Nutzung von Ressourcen und die Förderung einer Innovationskultur innerhalb des Unternehmen (Haag et al. 2010).

Der zentrale Nutzen der Technologiebewertung liegt in der Steigerung der Innovationsfähigkeit eines Unternehmens (Haag et al. 2010). Durch die frühzeitige Integration relevanter Technologien können Organisationen ihre Produktivität verbessern, neue Marktsegmente erschließen und langfristige Wettbewerbsvorteile erzielen (Schubert et al. 2010). Die Technologiebewertung ermöglicht eine effiziente Ressourcennutzung, indem sie sicherstellt, dass Investitionen in Forschung und Entwicklung gezielt auf vielversprechende Technologien ausgerichtet werden (Bullinger und Renz 2005). Dadurch werden finanzielle Mittel und Arbeitskräfte effektiver eingesetzt. Unternehmen, die kontinuierlich Technologien bewerten, sind besser in der Lage, sich an ändernde Marktbedingungen anzupassen (Bullinger und Renz 2005). Dieser Anpassungsfähigkeit liegt die Fähigkeit zugrunde, rechtzeitig auf neue Technologietrends zu reagieren und die Produkte oder Dienstleistungen anzupassen (Schubert et al. 2010).

Zusammenfassend unterstreicht die Technologiebewertung ihre Relevanz als strategisches Werkzeug im Technologie- und Innovationsmanagement. Durch die Erreichung ihrer Ziele ermöglicht sie Unternehmen proaktiv auf den sich ständig verändernden Technologielandschaften zu agieren und ihre Position in einem wettbewerbsintensiven Umfeld zu stärken. Im folgenden Abschnitt werden verschiedene Ansätze der Technologiebewertung vorgestellt.

2.2 Ansätze der Technologiebewertung

Um die Herangehensweise und den Kontext der Ansätze der Technologiebewertung zu vermitteln, wird in einem ersten Schritt die Peripherie, in der die Technologiebewertung eingesetzt wird, genauer erläutert. Dies beinhaltet u. a. die Vorgehensweise der Technologiebewertung als Bestandteil des Technologiemanagements darzustellen. Darüber hinaus wird ein tieferes Verständnis des in Abbildung 3 dargestellten Prozesses und der Zusammenhänge vermittelt.

Technologiemanagement umfasst die integrierte Planung, Gestaltung, Optimierung, Nutzung und Bewertung von technischen Produkten und Prozessen unter Berücksichtigung der

Perspektiven Mensch, Organisation, Technik und Umwelt zur Förderung der Wettbewerbsfähigkeit (Schubert et al. 2010). Eine Gemeinsamkeit der Ansätze des Technologiemanagements besteht darin, dass die strategischen Strukturierungsansätze sich grundlegend an dem Lebenszyklus einer Technologie orientieren (Moll et al. 2010). Der Prozess des Technologiemanagements zielt in diesem Kontext darauf ab, jene Technologien zu identifizieren, die zur Umsetzung der Unternehmensziele geeignet sind, und gleichzeitig Wege aufzuzeigen, die zur Beherrschung und Verwertung dieser Technologien führen (Speith 2008). Grundlegend ist der Prozess dem Einfluss von äußeren Faktoren ausgesetzt (Moll et al. 2010). Faktoren wie z. B. der technologische Reifegrad in der Branche oder die vorhandenen Ressourcen an technologischen Quellen beeinflussen die Prozesse und die relevanten Entscheidungen des Technologiemanagements (Moll et al. 2010). Der technologische Reifegrad einer Technologie beeinflusst beispielsweise die strategische Ausrichtung dieser Technologie im Unternehmen oder die Ausrichtung zu einer Technologiequelle, die maßgeblich von den verfügbaren Kompetenzen und Ressourcen abhängt. Mit diesen äußeren Einflussfaktoren müssen Unternehmen im gesamten Technologiemanagement-Prozess umgehen und ihren Aufbau und Ablauf so strukturieren, dass Prozesse effizient ablaufen (Bullinger 1996). In Anlehnung an Bullinger (1996) und Schuh und Klappert (2010) lässt sich der Technologiemanagement-Prozess in vier Unterprozesse einteilen (Bullinger 1996; Schuh und Klappert 2010). Abbildung 4 veranschaulicht die Unterprozesse im Technologiemanagement-Prozess mit den Umgebungsbedingungen und dient als Modell für die nachfolgenden Beschreibungen.

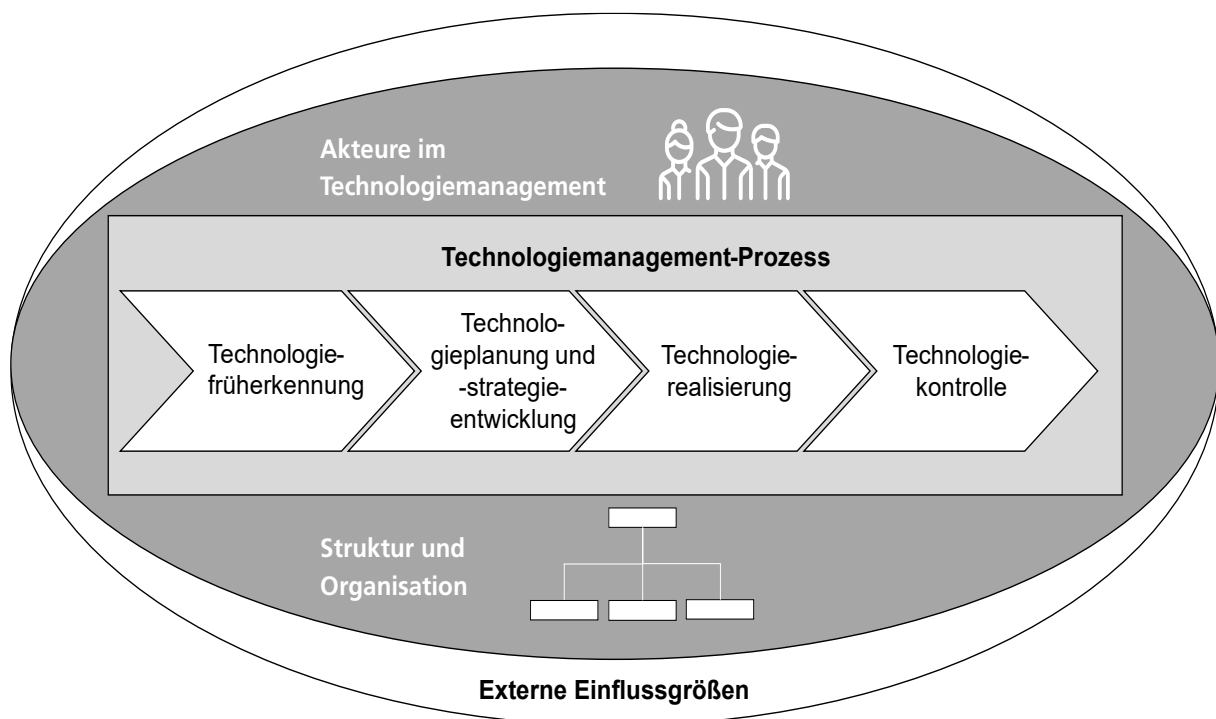


Abbildung 4: Technologiemanagement-Prozess in Anlehnung an Granig (2013, S. 207)

Neben dem Technologiemanagement-Prozess ist das Umfeld, in dem der Prozess abläuft, mit abgebildet. Das Technologiemanagement kann als Subsystem eines Unternehmens gesehen werden (Moll et al. 2010). In das Umfeld des Technologiemanagements integrieren sich diverse Akteure wie beispielsweise verschiedene Teams in der Abteilung, welche die Struktur

und Organisation dieses Bereichs maßgeblich mitbestimmen sowie Einflussgrößen aus dem umgebenden Umfeld (Granig 2013). Die beteiligten Akteure in den verschiedenen Phasen tragen die Verantwortung dafür sicherzustellen, dass nur solche Technologien langfristig im Unternehmen etabliert werden, die einen ökonomischen Mehrwert generieren (Haag et al. 2010). Darüber hinaus ist es erforderlich, veraltete Technologien frühzeitig zu identifizieren und abzubauen bzw. durch aktuellere zu ersetzen (Haag et al. 2010). Struktur und Organisation des Technologiemanagements ergeben sich aus der Aufbauorganisation, den Ressourcen, Informationssystemen und die etablierte Kultur (Moll et al. 2010). Hierzu zählen vor allem innerbetriebliche Aspekte (z. B. Unternehmensstruktur) und die Anspruchsgruppen (z. B. Forschung und Entwicklung, Produktion, Geschäftsleitung) (Alber und Gassmann 2005). Externe Einflüsse ergeben sich aus den Umweltsphären (z. B. Wettbewerber, Staat, Lieferanten), die auf das Unternehmen einwirken (Moll et al. 2010). Beispielsweise können politische Einflüsse einen signifikanten Einfluss auf das Technologiemanagement haben. Gesetzliche Vorschriften und Standards können sich ändern und Unternehmen dazu zwingen, ihre technologischen Praktiken anzupassen, um die Einhaltung neuer Vorschriften sicherzustellen. Die Struktur und Organisation sowie die externen Einflüsse des Technologiemanagements können je nach Unternehmen und Branche stark variieren (Alber und Gassmann 2005). Im Folgenden wird auf die Prozesse des Technologiemanagements genauer eingegangen.

Technologiefrüherkennung

Die Technologiefrüherkennung bezeichnet die Identifikation und Einschätzung von Technologieentwicklungen und Trends, die für das Unternehmen von Bedeutung sind (Granig 2013; Schuh et al. 2007; Wellensiek et al. 2010). In diesem Zusammenhang erfolgen Analysen und Prognosen mit dem Ziel, Potentiale von Technologien zu identifizieren sowie die technologischen Leistungsgrenzen bestehender Technologien zu ermitteln (Moll et al. 2010). Als Informationsquellen sind öffentliche Publikationen, Patente, Messen, persönliche Netzwerke aus Experten sowie Kontakte zu Wettbewerbern, Forschungsinstituten und Kongressen von besonderem Interesse (Granig 2013; Schuh et al. 2007). Eine effektive Nutzung der vorhandenen Ressourcen aus den gegebenen Informationsquellen ist hierbei entscheidend, um eine hohe Informationseffektivität zu erhalten (Wellensiek et al. 2010). Die Tätigkeitsfelder der Technologiefrüherkennung erstrecken sich über mehrere Themengebiete. Beispielhafte Aufgaben bestehen in der Analyse einschlägiger Technologiebereiche (Technologieanalyse) sowie die Identifikation neuer Technologien innerhalb und außerhalb spezifischer Technologiebereiche (Technologiescanning) (Moll et al. 2010). Darüber hinaus stellen die Beobachtung der Anwendung von Technologien durch andere (Technologiemonitoring) sowie die Prognose künftiger Entwicklungen in Technologien oder Fachgebieten (Technologieprognose) weitere Aufgaben dar (Wellensiek et al. 2010).

Technologieplanung und -strategieentwicklung

Die maßgeblichen Ergebnisse und Erkenntnisse der Technologiefrüherkennung nehmen eine bedeutende Rolle in der Technologieplanung und -strategieentwicklung ein (Orilski et al. 2010). In diesem Zusammenhang dienen die Informationen als essenzielle Grundlage für die Entscheidungsprozesse im Bereich der Technologie (Wellensiek et al. 2010). Im Zuge der

Technologieplanung und -strategieentwicklung wird eine Bewertung der durch die Technologiefrüherkennung gewonnenen Ergebnisse zur Ermittlung ihrer tatsächlichen Bedeutung für das Unternehmen vorgenommen (Specht und Möhrle 2002). Die Hauptaufgaben umfassen die Generierung von Ideen für den Einsatz neuer Technologien sowie die Analyse und Auswahl von Technologien, um fundierte Entscheidungen im Kontext zukünftiger technologischer Entwicklungen zu treffen (Wellensiek et al. 2010). Damit eine unternehmensweite Transparenz und Planungssicherheit gewährleistet wird, werden die zukünftigen Planungen beispielsweise in Technologie Roadmaps mit aufgenommen (Schuh et al. 2007). In Technologie Roadmaps wird dokumentiert welche Technologie zu welchem Zeitpunkt und für welchen spezifischen Anwendungszweck eingesetzt werden soll (Orilski et al. 2010). Neben der Technologieplanung hat das strategische Denken in den vergangenen Jahren enorm an Bedeutung zugenommen und den philosophischen, langfristigen Ansatz der Technologieplanung mit umstrukturiert (Orilski et al. 2010). Im Gegensatz zum langfristigen Ansatz beinhaltet die strategische Planung die Berücksichtigung technologischer Diskontinuitäten, d. h. wesentliche Veränderungen bedingt durch eine Technologie (Gerpott 2005). Darüber hinaus zeichnet sich die strategische Planung durch eine anpassungsfähige Reaktion auf veränderte Rahmenbedingungen sowie die Erschließung neuer technologischer Potentiale aus (Gerpott 2005). In der Strategieentwicklung werden die wesentlichen Ziele definiert, während die Technologieplanung als Operationalisierung der Technologiestrategie verstanden werden kann und den Weg zur Erreichung der vorgegebenen Ziele darstellt (Orilski et al. 2010). In diesem Zusammenhang werden die Fragestellungen beantwortet, welche Technologien und Wege dazu beitragen können die Ziele zu realisieren (Wolfrum 1991). Beispielhafte Ziele in diesem Kontext sind den Umsatz oder Marktanteil eines Unternehmens zu steigern, die Kundenanforderungen besser zu erfüllen, die Unternehmenspotentiale zu stärken, Wettbewerbsvorteile zu erzielen sowie Stärken aufzubauen bzw. Schwächen abzubauen (Specht und Möhrle 2002).

Technologierealisierung

Im Zuge der Technologierealisierung werden, die in der Phase der Technologieplanung und -strategieentwicklung erarbeiteten, Handlungskorridore durch die Ausarbeitung konkreter Maßnahmen zur Verwirklichung der technologischen Ziele finalisiert (Granig 2013). Dies impliziert, dass die Anforderungen für die Entwicklung neuer Technologien oder die Verbesserung im Unternehmen vorhandener Technologien innerhalb des vorgegebenen Zeitrahmens und unter Berücksichtigung der verfügbaren Ressourcen umgesetzt werden müssen (Moll et al. 2010). In diesem Kontext werden die neuen Technologien in die Anwendungsbereiche integriert, z. B. die Einführung von automatisierten Fertigungsrobotern in einen Produktionsprozess (Schuh et al. 2007). Darüber hinaus findet ein Übergang vom Technologiemanagement zu einem operativen Bereich statt, da die Maßnahmen die grundlegenden Aufgabenbereiche des Technologiemanagements überschreiten (Granig 2013).

Technologiekontrolle

Die Bewertung der Erfolge des Technologiemanagements erfolgt durch die Messung anhand der aus der Unternehmensstrategie abgeleiteten Ziele (Bullinger 1996). Auf diese Weise können die durchgeführten Aktivitäten bewertet werden und es besteht die Möglichkeit, Stellhebel

zur Steigerung von Effektivität und Effizienz zu identifizieren (Schuh et al. 2007). Ein weiteres Ziel der Technologiekontrolle manifestiert sich in der strategischen Ausrichtung, die eigene Innovationskraft zu nutzen, um Entwicklungen im Bereich eigener Technologien vor einem ungewollten Transfer von Fachwissen an Wettbewerber zu schützen (Moll et al. 2010). Dies wird durch die Ausarbeitung anspruchsvoller Protektionsmechanismen erreicht, welche darauf abzielen, die Imitation von Technologien und Produkten zu verhindern (Moll et al. 2010). Ein Beispiel hierfür wäre die exklusive Bindung von Zulieferern. Im Folgenden wird näher auf die Technologiebewertung im Kontext des Technologiemanagementprozesses eingegangen. Abbildung 5 stellt hierbei die Technologiebewertung im Kontext des Technologiemanagementprozesses dar.

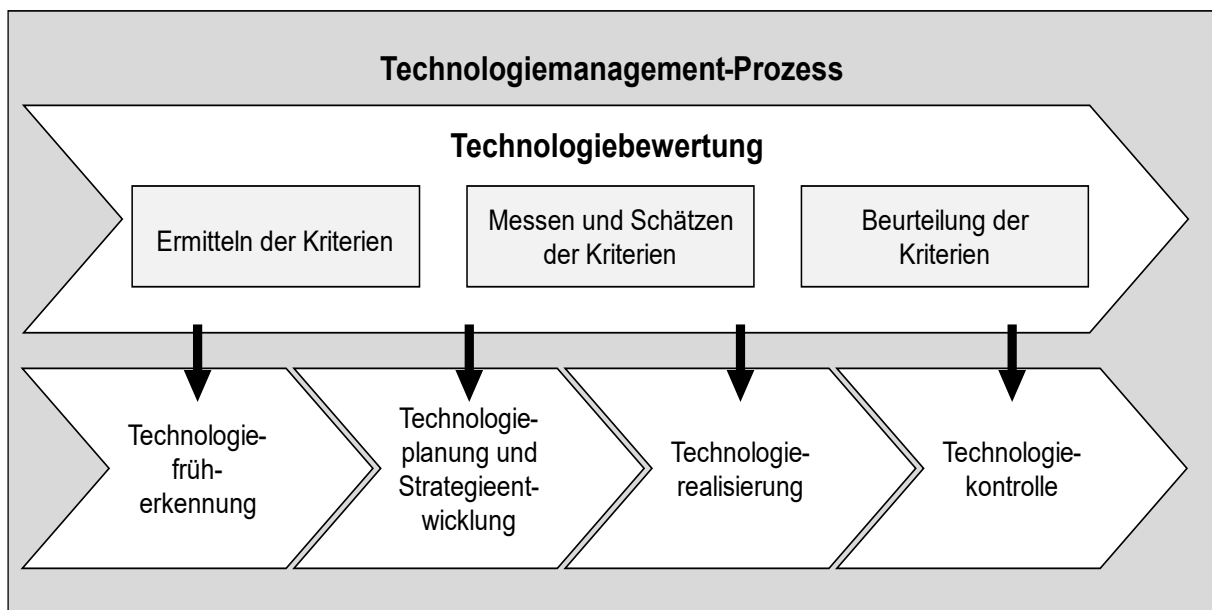


Abbildung 5: Technologiebewertung im Kontext des Technologiemanagementprozesses in Anlehnung an Moll et al. (2010, S. 17)

Die Phasen des Technologiemanagements-Prozess werden durch die Technologiebewertung ergänzt. In jeder der Phasen werden Entscheidungen getroffen, die eine Technologiebewertung erfordern (Moll et al. 2010). Gemäß Specht und Möhrle (2002) beschreibt Technologiebewertung den Prozess der Ermittlung und Bewertung des Grades, mit dem vorgegebene Zielsetzungen für ein festgelegtes Bewertungsobjekt erreicht werden, um Entscheidungen in Bezug auf die Entwicklung, Einführung und Nutzung von Technologien treffen zu können (Specht und Möhrle 2002). Specht und Möhrle (2002) beschreiben darüber hinaus die Technologiebewertung als die Notwendigkeit, Parameter des Bewertungsobjekts zu messen und zu schätzen sowie die Vor- und Nachteile verschiedener Alternativen aus technischer, wirtschaftlicher, organisatorischer, sozialer und zeitlicher Perspektive zu ermitteln (Specht und Möhrle 2002). Hierbei werden insbesondere die Nutzung von Kriterien bei der Auswahl von Technologien hervorgehoben sowie die verschiedenen Dimensionen, auf denen sich die Technologiebewertung bewegt.

Die Technologiebewertung stellt vor diesem Hintergrund eine wichtige, phasenübergreifende Voraussetzung für ein effizientes und effektives Technologiemanagement dar (Moll et al.

2010). Für eine qualitative und quantitative Entscheidungsfindung sowie Steigerung des Handlungserfolgs werden Verfahren und Ansätze der Technologiebewertung herangezogen, die sich je nach Technologiemanagement-Phase in ihrem inhaltlichen und strukturierten Vorgehen unterscheiden können (Moll et al. 2010; Haag et al. 2010; Granig 2013; Kröll 2007). In diesem Kontext werden qualitative und quantitative Verfahren voneinander unterschieden (Haag et al. 2010). Abbildung 6 zeigt unterstützende qualitative und quantitative Verfahren in der Technologiebewertung.

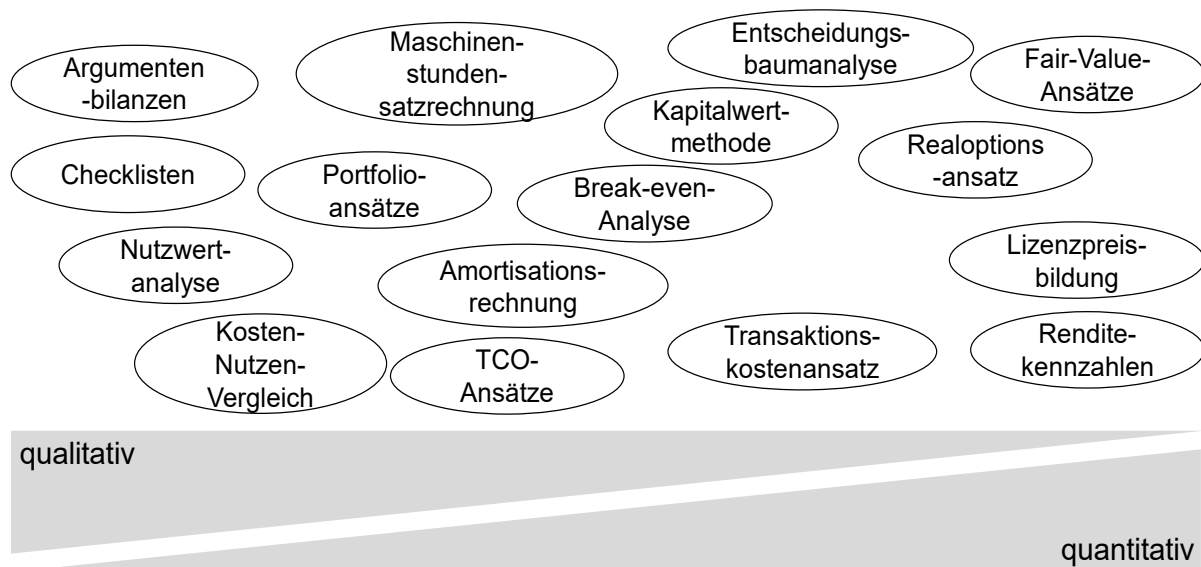


Abbildung 6: Unterstützende Verfahren in der Technologiebewertung in Anlehnung an Haag et al. (2010, S. 312)

Quantitative Verfahren in der Technologiebewertung beinhalten die systematische Erhebung, Messung und Analyse von numerischen Daten (Kirchmair 2022). Dies kann durch statistische Modelle, Umfragen, Experimente und weitere Ansätze erfolgen (Haag et al. 2010). Das Ziel ist es, objektive und reproduzierbare Ergebnisse zu erhalten, die es ermöglichen, die Effizienz, Leistung und weitere quantitative Auswirkungen einer Technologie zu quantifizieren (Haag et al. 2010). Im Gegensatz dazu konzentrieren sich qualitative Verfahren in der Technologiebewertung auf die Erfassung, Interpretation und Analyse nicht-numerischer Daten (Kirchmair 2022). Dies kann durch Interviews, Fallstudien, Fokusgruppen und andere qualitative Forschungsansätze erfolgen (Zahn 1995). Hierbei ist das Ziel ein tiefes Verständnis für die kontextuellen, sozialen und ethischen Aspekte einer Technologie zu entwickeln (Haag et al. 2010). Qualitative Analysen können Einblicke in soziale Akzeptanz, kulturelle Auswirkungen, ethische Fragestellungen und andere nicht leicht messbare Faktoren bieten (Kirchmair 2022). Der wesentliche Unterschied zwischen qualitativen und quantitativen Verfahren liegt in der Art der Daten, die gesammelt und analysiert werden (Hall 2002). Quantitative Verfahren verwenden numerische Daten zur Erfassung messbarer Größen, während qualitative Verfahren auf nicht-numerische Daten basieren, um kontextuelle und interpretative Einblicke zu gewinnen (Kirchmair 2022). Die Integration beider Verfahren kann zu einer ganzheitlichen Technologiebewertung führen, die sowohl quantitative und qualitative Aspekte berücksichtigt (Hall 2002). In der VDI-Richtlinie 3780 werden weitere wissenschaftliche, methodische Prinzipien dargestellt,

allerdings mit Bezug auf die Technikbewertung (VDI 3780 2000). Aufgrund des engen Zusammenhangs der Begriffe Technologie und Technik können diese bei der Technologiebewertung ebenfalls angewendet werden (Kröll 2007).

Im Folgenden wird dahingehend auf die Technologiebewertung in den verschiedenen Phasen des Technologiemanagementprozess eingegangen und Charakteristika sowie Ansätze herausgestellt. Die Bewertung einer Technologie in der Technologiefrüherkennung ist verbunden mit einer hohen Unsicherheit (Haag et al. 2010). Dies ist bedingt durch die fehlende Grundlage an Informationen über die Anwendung einer Technologie in Prozessen sowie dem Prognostizieren der Leistungsmerkmale für die Zukunft (Haag et al. 2010). Eine Aufgabe der Technologiefrüherkennung besteht somit darin, in einem komplexen, undurchsichtigen und dynamischen Umfeld eine Grundlage für unternehmensrelevante Entscheidungen zu schaffen (Wellsiek et al. 2010). Es ist entscheidend, schwache Signale frühzeitig zu erkennen, um eine angemessene Reaktionszeit zu gewährleisten und den Handlungsspielraum des Unternehmens angesichts bevorstehender technologischer Veränderungen im Vergleich zu Wettbewerbern zu erweitern (Wolfrum 1991). Für die Schaffung einer Bewertungsgrundlage sind neben externen Informationen über die Zukunftsrelevanz einer Technologie ebenfalls interne Daten über unternehmensspezifische Chancen und Risiken entscheidend (Haag et al. 2010). In der Phase der Technologiefrüherkennung sind somit die Aspekte der Informationsbeschaffung und Informationsbewertung besonders relevant bei der Technologiebewertung (vgl. Abb. 7).

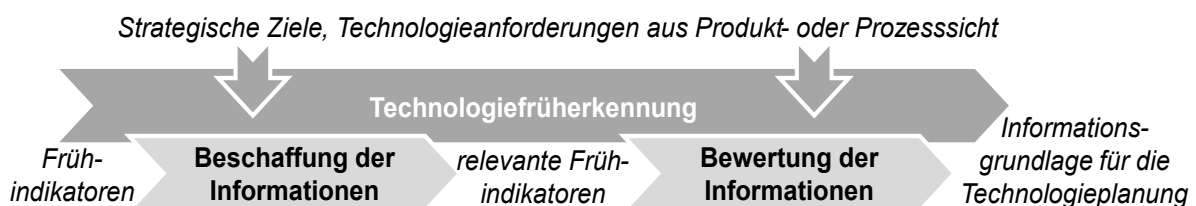


Abbildung 7: Technologiebewertung in der Technologiefrüherkennung in Anlehnung an Brodbeck (1999, S. 89)

Im Rahmen der Informationsbeschaffung ist insbesondere die Selektion von Technologien beim Technologyscanning und -monitoring relevant (Gochermann 2020). Schwache Signale werden mit definierten Suchfeldern, welche sich am Technologieportfolio des Unternehmens orientieren, hinsichtlich ihrer Relevanz abgeglichen (Gochermann 2020). In einem Technologieportfolio werden die internen und externen relevanten Kriterien einer Technologiebewertung als Messgrößen verwendet (Metze 2008). Bei der Informationsbewertung wird der Fokus zur weiteren Filterung der Technologieoptionen für die Technologieplanung auf Leistungsparameter wie beispielsweise die Energieeffizienz gesetzt (Haag et al. 2010). Aufgrund der Gewährleistung der Sicherheit der Zukunftsprognose und der ungenügenden Informationsgrundlage sind in der Technologiefrüherkennung vorwiegend qualitative Verfahren von Bedeutung (Haag et al. 2010).

In der Planung und Entwicklung von Technologiestrategien nimmt die Technologiebewertung einen wichtigen Bestandteil ein und wird in der Literatur in der Regel ausschließlich als integraler Bestandteil dieser Phase betrachtet (Haag et al. 2010). In diesem Zusammenhang sind

detaillierte Bewertungsprozesse als Entscheidungsunterstützung zur Minimierung der Unsicherheit bei der Auswahl einer geeigneten Technologiestrategie notwendig (Haag et al. 2010). Das Ziel der Technologiebewertung in dieser Phase besteht darin, Technologien zu identifizieren, die einen realen und nachhaltigen ökonomischen Mehrwert schaffen können (Pfeiffer und Weiß 1995). Die Randbedingungen der Technologiebewertung ergeben sich vor diesem Hintergrund aus drei Aspekten (Haag et al. 2010):

- Hohe Tragweite der Entscheidungen
- Mehrdimensionale Entscheidungsfindung
- Wirtschaftliche Bewertung von Technologien

Hohe Tragweiten der Entscheidungen resultieren aus dem hohen Ressourceneinsatz bei der Technologiebewertung sowie der hohen Wettbewerbsrelevanz in dieser Phase (Orilski et al. 2010). Aufgrund der Komplexität und Vielfältigkeit der strategischen Entscheidungssachverhalte, ist eine mehrdimensionale Entscheidungsfindung notwendig (Haag et al. 2010). Ein Beispiel hierfür ist in Abbildung 3 dargestellt. Die Bewertung des wirtschaftlichen Nutzens der Technologie ergibt sich aus dem Ziel, mit der eingesetzten Technologie einen ökonomischen Mehrwert zu erzielen (Orilski et al. 2010). Den Ausgangspunkt bei der Bewertung stellen verschiedene Handlungsoptionen mit einer Auswahl an Technologien aus jeder der Technologielebenszyklusphasen dar (Haag et al. 2010). Der Technologielebenszyklus (TLZ) einer Technologie lässt sich in vier Phasen untergliedern: Einführung, Penetration, Reife und Degeneration (vgl. Abb. 8).

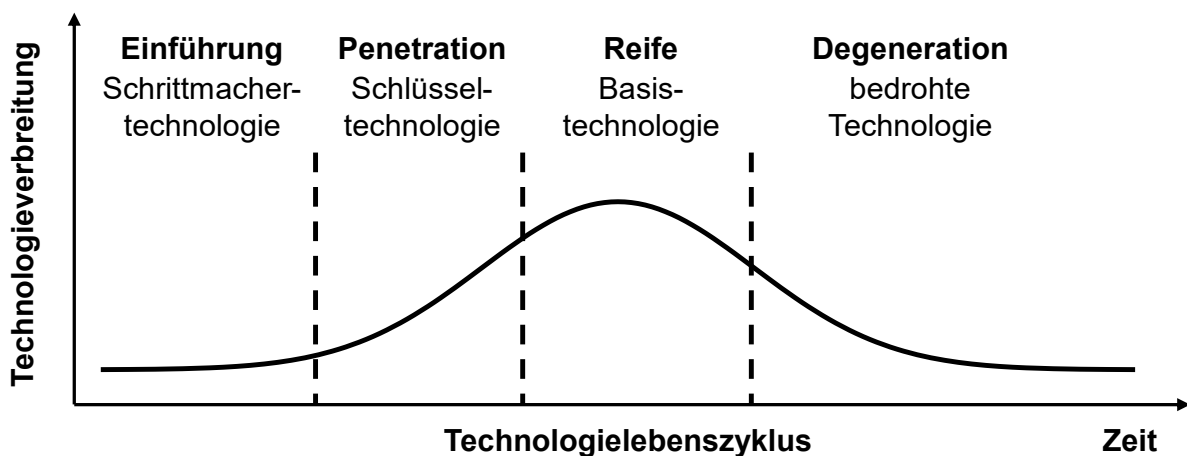


Abbildung 8: Technologielebenszyklus in Anlehnung an Gochermann (2020, S. 6)

In der Regel wird die zeitliche Entwicklung des nutzenbringenden Einsatzes der Technologie, d. h. ihre Verbreitung, dargestellt (Gochermann 2020). Die Verbreitung von Schrittmachertechnologien ist sehr gering und die Erschließung derartiger Technologien ist mit einem großen Aufwand verbunden (Schubert et al. 2010). Schlüsseltechnologien repräsentieren entwickelte Technologien, die noch nicht weit verbreitet sind und umfassende Kenntnisse erfordern, um ihr Potential vollständig zu erschließen (Wolfrum 1991). Die Nutzung dieser Technologien trägt zur Stärkung der eigenen Wettbewerbsposition bei (Zahn 1995). Basistechnologien sind etablierte Technologien, die von vielen Unternehmen beherrscht werden und nur geringe

Möglichkeiten zur Differenzierung bieten (Gochermann 2020). Bedrohte Technologien durchlaufen eine Degeneration und nähern sich dem Ende ihrer Leistungsfähigkeit, weshalb sie von anderen Technologien substituiert werden (Schubert et al. 2010). Im Hintergrund der Technologielebenszyklusphasen ist in der Technologieplanung somit nicht nur die Frage der Technologieauswahl von Bedeutung, sondern ebenfalls die weiteren Schritte, die mit der Technologie erfolgen sollen (Grunwald 2009). Beispiele hierfür sind die Weiterentwicklung oder der Einsatz der Technologie in der Produktion.

Bei der Technologieplanung findet hier eine Vorselektion der Handlungsoptionen statt. Die Auswahl von geeigneten Bewertungsansätzen ist in diesem Kontext von großer Wichtigkeit (Haag et al. 2010). Hierbei werden die Handlungsoptionen mit der höchsten Eignung meist anhand von qualitativen Ansätzen herausgefiltert, jedoch ist zudem die Anwendung quantitativer Ansätze möglich (Haag et al. 2010). In der Feinbewertung bzw. Auswahl einer Handlungsoption findet die wirtschaftliche Bewertung statt, wobei insbesondere quantitative Ansätze zum Einsatz kommen (Haag et al. 2010). Besonders hervorzuheben ist die Überprüfung der Glaubwürdigkeit der Technologiebewertung in dieser Phase zur Untersuchung der Unsicherheit der Ergebnisse (Banta 2009). Die Unsicherheit ist u. a. mit der Technologiestrategieentwicklung verbunden. Zu Beginn eines Projektes ist der konkrete Anwendungszusammenhang für eine Technologie noch nicht bekannt und die technologische Umsetzbarkeit fraglich (Cooper 2006).

Während der Realisierungsphase der Technologie sind Maßnahmen zur Beschaffung und Verwertung von Technologien zu koordinieren (Granig 2013). Beispielsweise darüber, ob das Wissen über Technologien intern zur Erlangung von Wettbewerbsvorteilen genutzt wird oder über den internen Einsatz hinaus eine gemeinschaftliche Nutzung, Lizenzvergabe oder sogar ein Verkauf von Interesse ist (Cooper 2006). Quantitative Ansätze werden in diesem Kontext herangezogen, um Entscheidungen zu treffen (Haag et al. 2010). Der maximale Nutzen einer Technologie für Unternehmen wird erzielt, wenn eine optimale Kombination aus interner und externer Verwertung erreicht wird (Wolfrum 1991). Neben den quantitativen Ansätzen sind qualitative Ansätze relevant zur Berücksichtigung der strategischen Ausrichtung eines Unternehmens (Haag et al. 2010). Faktoren wie z. B. Branchensituation oder wettbewerbsstrategische Ziele eines Unternehmens bilden qualitative Einschätzungen, die mit berücksichtigt werden müssen (Wolfrum 1991).

Auf die Technologiebewertung in der Technologiekontrolle wird spezifisch nicht eingegangen, weil die Kontrolle selbst in erster Linie darauf abzielt, den Transfer oder die Verbreitung sensibler oder gefährlicher Technologien zu regulieren oder zu verhindern (Bullinger 1996). Ein wesentlicher Aspekt, der hervorgehoben werden sollte, ist die regelmäßige Überwachung der Technologien (Specht und Möhrle 2002). Dies kann insbesondere durch qualitative Methoden erfolgen, um das Technologiemanagement frühzeitig über unerwünschte Entwicklungen zu informieren und Anpassungen im Planungsprozess vorzunehmen (Bullinger 1996).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Ansätze der Technologiebewertung in den jeweiligen Phasen des Technologiemanagementprozesses unterschiedlich eingesetzt werden. Während in der Technologiefrüherkennung vorwiegend qualitative Ansätze zur Selektion

herangezogen werden, sind in der Phase der Technologieplanung und -strategieentwicklung quantitative Ansätze mehr von Bedeutung. Festzuhalten ist, dass eine Mischung aus dem Einsatz von qualitativen und quantitativen Ansätzen die Erfolgswahrscheinlichkeit bei der Entscheidungsunterstützung erheblich steigert. Die Wichtigkeit der Technologiebewertung im Technologiemanagementprozess wird besonders in der Technologieplanung und Strategieentwicklung deutlich, wenn multidimensionale Entscheidungen mit hoher Tragweite und ökonomischen Folgen betrachtet werden. Die Technologiebewertung ist in diesem Kontext von Bedeutung zur Unterstützung der strategischen Entscheidungen. Im Folgenden Abschnitt werden verschiedene Kriterien für die Bewertung betrachtet, die für die Auswahl einer geeigneten Technologie entscheidend sind. Hierbei wird der Fokus auf Bewertungskriterien für Produktionstechnologien gerichtet.

2.3 Kriterien für die Bewertung von Produktionstechnologien

In diesem Abschnitt wird untersucht, welche Kriterien bei der Bewertung von Produktionstechnologien berücksichtigt werden. Die Bewertung von Produktionstechnologien spielt eine entscheidende Rolle im strategischen Technologiemanagement von Unternehmen, um effiziente und wettbewerbsfähige Fertigungsprozesse zu gewährleisten (Schönmann et al. 2018). In dieser Arbeit werden in Anlehnung an Hall (2002) unter dem Begriff *Kriterium* alle Eigenschaften, Parameter, Einflussgrößen, Variablen, Elemente oder ähnliche Aspekte zusammengefasst, die die Beschreibung oder Beeinflussung einer Technologie betreffen (Hall 2002). Ein *Bewertungskriterium* stellt in diesem Zusammenhang ein Abgrenzungsbegriff dar, der zur finalen Beurteilung einer Technologie ermittelt und beurteilt wird (Hall 2002). In diesem Zusammenhang können diverse Kriterien auf verschiedenen Abstraktionsniveaus in die Formulierung eines Bewertungskriteriums einbezogen werden (Hall 2002). Ein Beispiel für ein solches Bewertungskriterium ist die Wirtschaftlichkeit, die u. a. durch Faktoren wie die Herstellkosten beeinflusst wird (Fallböhrer 2000). Hierbei sind die festgelegten Kriterien von zentraler Bedeutung, da sie die Grundlage für eine umfassende Analyse der Eignung, Leistung und langfristigen Erfolgspotentiale der eingesetzten Technologien bilden (Schönmann et al. 2018). Die Auswahl geeigneter Bewertungskriterien wird kontextabhängig vorgenommen, indem die verschiedenen Organisationsbereiche des Unternehmens sowie die Phasen des Technologiemanagementprozesses berücksichtigt werden (Haag et al. 2010). Darüber hinaus ist die Nutzung von Kriterien unterschiedlich, je nachdem ob beispielweise ein qualitativer oder quantitativer Ansatz zur Technologiebewertung herangezogen wird (Haag et al. 2010).

In der wissenschaftlichen Literatur werden bezüglich der Erfassbarkeit quantitative und qualitative Kriterien unterschieden (Schönmann et al. 2018). Bei quantitativen Kriterien handelt es sich um messbare Größen, die durch Zahlenwerte modellierbar sind und daher anhand von mathematischen Zusammenhängen, wie z. B. Formeln oder Algorithmen, aggregiert werden können (Rosenkranz und Missler-Behr 2005). Quantitative Kriterien für die Bewertung von Technologien umfassen beispielsweise die Gesamtkosten der Technologieimplementierung oder den Durchsatz einer Technologie. Im Gegensatz dazu können qualitative Kriterien nur verbal als niedrig oder hoch beschrieben werden und lassen sich nicht direkt in Form von Zahlenwerten erfassen (Brieke 2009). Beispielsweise lassen sich die Energieeffizienz oder

das Wettbewerbspotential nur schwer messen und werden dahingehend von Experten geschätzt (Reinhart et al. 2011). Die Zuordnung verbaler Aussagen zu konkreten Zahlenwerten und ihre einfache Verrechnung gestalten sich aufgrund ihrer üblicherweise interpretierbaren Natur und begrenzten Möglichkeit zur präzisen Spezifizierung oder Verallgemeinerung als erschwert (Zimmermann et al. 1993). Neben der klassischen Unterscheidung bei der Erfassbarkeit, existieren in der Literatur noch weitere Klassifizierungsansätze von Kriterien (vgl. Tab. 1).

Tabelle 1: Merkmale zur Klassifikation von Kriterien in Anlehnung an Schindler (2014, S. 23)

Merkmals	Ausprägung	Beispiel
Erfassbarkeit	quantitativ/qualitativ	Stückzahl/ Mitarbeiter Know-How
Vorhersagbarkeit	sicher/unsicher	Maschineninvestition/Materialpreis
Beeinflussbarkeit	unabhängig/abhängig	Mitarbeiterstundensatz/Transportwege
Dynamik	statisch/dynamisch	Flächenbedarf/Wechselkurse
Kontinuität	kontinuierlich/diskret	Energiekosten/Schichtanzahl

Hierbei werden neben der Erfassbarkeit die Merkmale Vorhersagbarkeit, Beeinflussbarkeit, Dynamik und Kontinuität mit Ausprägungen genannt (vgl. Tab.1). Die Investitionskosten einer Maschine werden beispielsweise als ein sicheres Kriterium betrachtet, da anhand von Angeboten ein fester Wert angenommen werden kann (Krebs 2012). Im Gegensatz dazu kann für unsichere Kriterien kein eindeutiger Wert prognostiziert werden (Rimpau 2011). Beispielsweise stellen schwankende Material- und Energiekosten ein unsicheres Kriterium dar (Wöhe et al. 2016). Beeinflussbarkeit von Kriterien betrifft die Möglichkeit, sie durch bewusste Interventionen oder externe Faktoren zu modifizieren oder zu beeinflussen, sei es durch politische Maßnahmen, technologische Innovationen oder kulturelle Veränderungen (Krebs 2012). Die Dynamik von Kriterien beschreibt hingegen ihre Fähigkeit, sich basierend auf sich verändernden Bedingungen im Laufe der Zeit zu verändern oder anzupassen (Wöhe et al. 2016). Kontinuität von Kriterien bezieht sich auf ihre Beständigkeit oder Stabilität über die Zeit hinweg, wobei sich ihre Bedeutung oder Relevanz nicht wesentlich ändert (Rimpau 2011). Eine gezielte Auswahl von Kriterien für ein Bewertungsmodell ergibt sich aus dem Zusammenwirken verschiedener Aspekte auf die Bewertung von Technologien, wie in Abbildung 9 beispielhaft dargestellt.

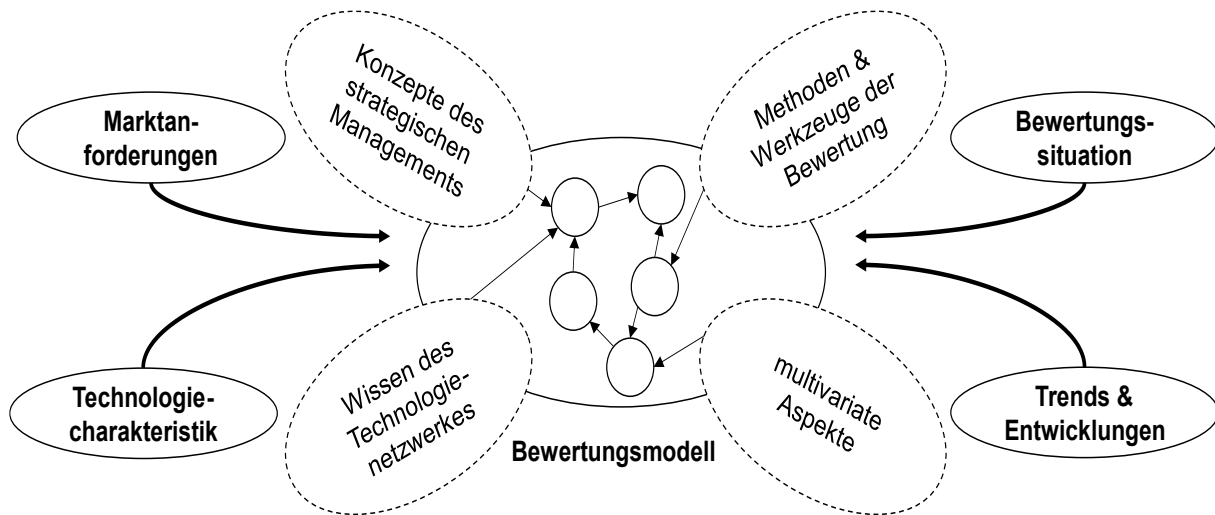


Abbildung 9: Darstellung des Zusammenwirkens einzelner Aspekte zur Bewertung in Anlehnung an Hall (2002, S. 5)

Ein Modell stellt eine Abbildung eines Originals dar (Altman und Royston 2000). Zelewski (1999) klassifiziert Modelle in Anbetracht ihrer Zielsetzung und Anwendung, wobei Bewertungsmodelle den Entscheidungsmodellen zugeordnet werden (Zelewski 1999). Entscheidungsmodelle werden mit dem Ziel eingesetzt Handlungsalternativen zu identifizieren und zu evaluieren (Zelewski 1999). Im Kontext eines vordefinierten Zielsystems werden optimale Modellstrukturen durch die Anwendung von beispielsweise Nutzenfunktionen, Randbedingungen und Entscheidungsvariablen ermittelt (Zelewski 1999). Zur Konstruktion eines Bewertungsmodells für Produktionstechnologien sind die Aspekte Marktanforderungen, Technologiecharakteristik, Bewertungssituation sowie Trends und Entwicklungen zu berücksichtigen (vgl. Abb. 9). Die wesentlichen Bestandteile zur Bewertung setzen sich aus der Nutzung von Verfahren und Werkzeugen der Technologiebewertung, den strategischen Konzepten des Managements, dem vorhandenen Wissen des Technologienetzwerks sowie multivariate Aspekte (z. B. Berücksichtigung mehrerer Finanzkennzahlen) zusammen (vgl. Abb. 9). Im weiteren Verlauf der Arbeit wird der Begriff Modell beibehalten und der Begriff Technologiebewertungsverfahren als synonym für Technologiebewertungsmodelle verwendet.

Zur Darstellung eines grundlegenden Überblicks über die Kriterien bei der Bewertung und Auswahl von Produktionstechnologien werden diese anhand einer durchgeführten Studie von Schindler (2014) und der wissenschaftlichen Literatur herausgestellt und erläutert. Die relevanten Bewertungskriterien für Produktionstechnologien ergeben sich wie folgt (Schönmann et al. 2018; Schindler 2014):

- Wirtschaftlichkeitsbewertung unter Unsicherheit
- Technische Machbarkeit
- Reifegradbewertung
- Potentialbewertung

In diesem Zusammenhang ist neben den konventionellen Bewertungskriterien wie die Wirtschaftlichkeit und die technologische Machbarkeit insbesondere der Reifegrad von besonderer Bedeutung (Schönmann et al. 2018). Die Ursache hierfür liegt in der Tatsache, dass der

Reifegrad einen signifikanten Einfluss auf das mit der Implementierung einer neuartigen Technologie assoziierte Risiko ausübt (Schindler 2014). Zusätzlich zum Reifegrad ist die Bewertung des damit verbundenen Potentials zu beurteilen, um festzustellen, inwieweit der Einsatz der Technologie Vorteile generieren kann (Schindler 2014). Im Folgenden werden die oben genannten Kriterien erläutert.

Wirtschaftlichkeitsbewertung unter Unsicherheit

Eine Wirtschaftlichkeitsbewertung vergleicht den Input in eine Investition mit dem (zu erwartenden) Output (Homann 2005). Die Bestimmung der Wirtschaftlichkeit erfolgt grundlegend durch den Transformationsprozess bzw. die spezifische Bearbeitungsaufgabe und stellt die Zielerfüllung in Relation zum eingesetzten Mittelaufwand dar (Schubert et al. 2010). In diesem Prozess werden diverse variable Kosten identifiziert, die im Zuge der Implementierung der Technologie entstehen, wie etwa Kosten für Beschaffung, Entwicklung und Einsatz (Orilski et al. 2010). Die traditionelle Wirtschaftlichkeitsbewertung basiert auf Annahmen, die oft deterministisch sind und Unsicherheiten außer Acht lassen (Homann 2005). Eine Berücksichtigung von Unsicherheiten in der Wirtschaftlichkeitsbewertung von Produktionstechnologien eröffnet Unternehmen die Möglichkeit, robustere und realistischere Entscheidungen zu treffen (Granig 2013). Es ermöglicht eine fundierte Einschätzung der Risiken und Chancen, die mit der Einführung neuer Technologien verbunden sind (Granig 2013). In diesem Zusammenhang ist es wichtig, nicht nur finanzielle Unsicherheiten, sondern darüber hinaus technologische, marktbezogene und strategische Unsicherheiten zu analysieren (Homann 2005). Abbildung 10 stellt den Transformationsprozess mit eingehendem Input und resultierendem Output dar.

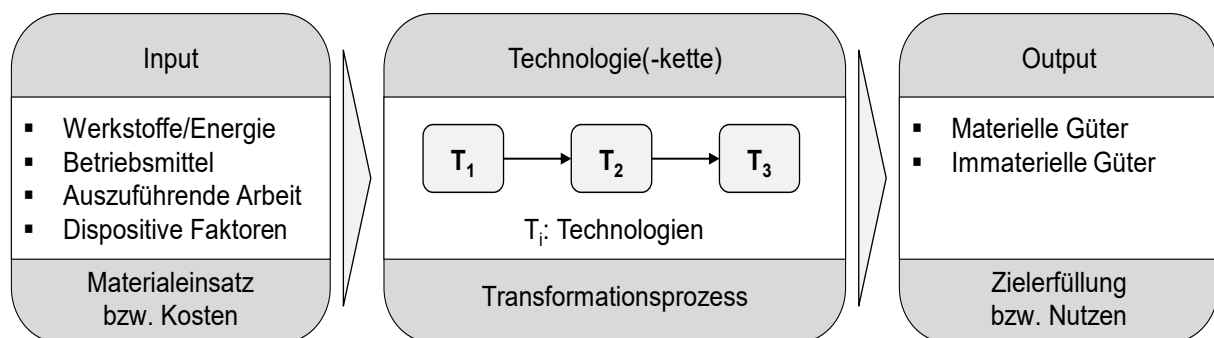


Abbildung 10: Transformationsprozess durch eine Technologie zur Leistungserstellung in Anlehnung an Schindler (2014, S. 62)

In diesem Kontext ergibt sich der Input aus den grundlegenden Produktionsfaktoren, einschließlich Materialien und Energie, den eingesetzten Betriebsmitteln und Mitarbeitern sowie den dispositiven Faktoren, die für die Führung, Planung und Organisation erforderlich sind (vgl. Abb. 10). Der Output beinhaltet die erzielte Wertschöpfung in Form von materiellen Gütern (Produkten) oder immateriellen Gütern (Dienstleistungen) (vgl. Abb. 10). Das primäre Ziel eines Unternehmens besteht in der Maximierung des Verhältnisses von Output zu Input, um die Effizienz zu steigern (Schindler 2014). Ein Modell zur Bestimmung der Wirtschaftlichkeit von Produktionstechnologien stellt das vierphasige Vorgehen von Schindler (2014) dar.

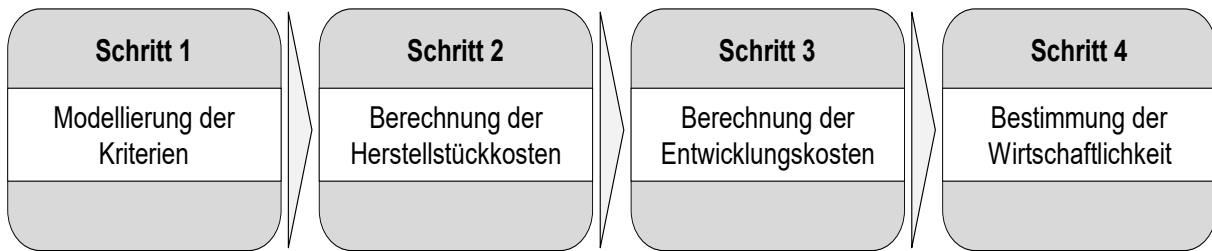


Abbildung 11: Methode zur Bestimmung der Wirtschaftlichkeit in Anlehnung an Schindler (2014, S. 68)

Hierbei werden in einem ersten Schritt qualitative und quantitative Kriterien modelliert, die sich auf die Bestimmung der Herstellstückkosten sowie der Ermittlung der Entwicklungskosten auswirken (Schindler 2014). Im zweiten Schritt erfolgt zunächst die Ermittlung der Herstellstückkosten der Technologie, bestehend aus Materialstückkosten und Fertigungsstückkosten (Schindler 2014). Anschließend erfolgt eine Abschätzung der Entwicklungskosten der Technologie, bestehend aus Investitionskosten, Personalkosten, Werkstoffkosten, Dienstleistungskosten, Lizenzkosten und Energiekosten (Schindler 2014). Im vierten Schritt erfolgt die Aggregation der zuvor ermittelten Kosten einer Technologie, um die Wirtschaftlichkeit dieser zu determinieren (Schindler 2014). Dafür wird der Kapitalwert (*engl.* Net Present Value (NPV)) ermittelt. Der NPV einer Investition I_0 , die zum Zeitpunkt $t = 0$ getätigt wird, ergibt sich gemäß Wöhe et al. (2016) aus der Summe der Einzahlungen E_t und der Auszahlungen A_t (Wöhe et al. 2016). Diese werden über die Betrachtungsperiode T auf den gegenwärtigen Zeitpunkt durch den Kalkulationszinssatz i_{NPV} diskontiert. Der Kalkulationszinssatz i_{NPV} wird durch die Unternehmensführung festgelegt und richtet sich üblicherweise nach der Rentabilität oder dem Return on Investment (Wöhe et al. 2016). In diesem Zusammenhang wird der Kapitalwert NPV mit folgender Formel berechnet (Wöhe et al. 2016):

$$NPV = I_0 + \sum_{t=1}^T \frac{E_t + A_t}{(1 + i_{NPV})^t} \quad (1)$$

Ein Kapitalwert $NPV \geq 0$ weist darauf hin, dass die getätigte Investition innerhalb des betrachteten Zeitraums aufgrund der Rückflüsse amortisiert wird (Wöhe et al. 2016). In diesem positiven Szenario übersteigt der erwirtschaftete Gewinn aus der Investition sowohl die Amortisation als auch die kalkulatorischen Zinsen. Im Gegensatz dazu lohnt sich eine Investition mit einem Kapitalwert $NPV < 0$ nicht (Wöhe et al. 2016).

Zusammenfassend zielt die Wirtschaftlichkeitsbewertung darauf ab, fundierte Entscheidungen zu treffen, ob die Einführung einer neuen Produktionstechnologie langfristig rentabel ist und zum Erfolg des Unternehmens beiträgt. Sie bietet eine solide Grundlage für Investitionsentscheidungen und trägt dazu bei, Risiken zu minimieren und Chancen zu nutzen.

Technische Machbarkeit

Die Bewertung der technischen bzw. produktionstechnischen Machbarkeit ist bei der Auswahl von geeigneten Technologien unerlässlich, da sie die Produzierbarkeit der herzustellenden Produkte sicherstellt (Trommer 2001). In diesem Kontext bezieht sich die technische

Machbarkeit auf die reproduzierbare Umsetzbarkeit eines Produkts (Fallböhmer 2000). Es wird gefordert, dass unter Berücksichtigung eines bekannten Werkstoffs eine vorgegebene Geometrie in der geforderten Qualität hergestellt werden kann (Trommer 2001). In der wissenschaftlichen Literatur existieren zahlreiche Ansätze zur Bewertung der technischen Machbarkeit (Fallböhmer 2000; Trommer 2001; Schindler 2014). Zur Verdeutlichung der Bestimmung der technischen Machbarkeit, wird das entwickelte Vorgehen von Schindler (2014) vorgestellt und erläutert.

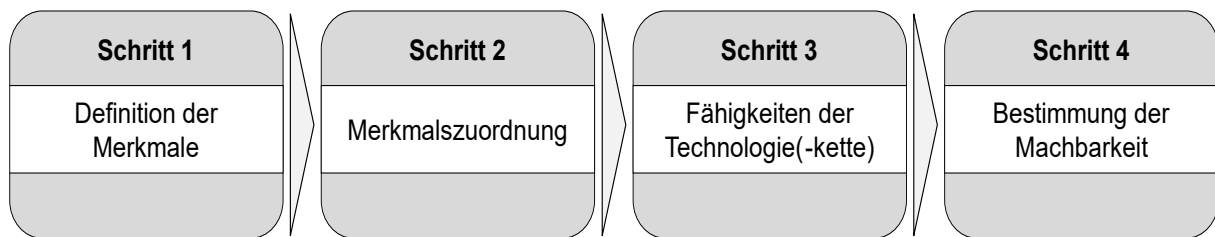


Abbildung 12: Methode zur Bestimmung der technischen Machbarkeit in Anlehnung an Schindler (2014, S. 79)

Die Methode besteht aus vier Schritten. Zur Bestimmung der technischen Machbarkeit werden in einem ersten Schritt die Werkstoff-, Produktions- und Produktmerkmale definiert (Schindler 2014). Auf der Ebene der Werkstoffe stellen diese die Resultate aus den Anforderungen der Materialien und Legierungen dar z. B. hinsichtlich der Schweißbarkeit (Schindler 2014). Die Produktionsmerkmale beziehen sich auf die produktionstechnischen Rahmenbedingungen und stellen beispielsweise Anforderungen an die Prozess- und Durchlaufzeiten, die eine Technologie erfüllen muss (Schindler 2014). Mittels der Produktmerkmale wird beurteilt, ob sämtliche grundlegenden Elemente der Formgebung und geometrischen Abmessungen des Produkts realisierbar sind und ob sämtliche Komponenten oder Bauteile miteinander verbindbar sind (Schindler 2014). Das Kriterium der technischen Machbarkeit gilt als gewährleistet, sofern alle Werkstoff-, Produktions- und Produktmerkmale erfüllt sind (Schindler 2014). Dafür werden Mindest- und Maximalanforderungen für die Merkmale formuliert, die eine Technologie einhalten muss. In einem zweiten Schritt werden die identifizierten Merkmale den Technologien zugeordnet, die der Bewertung betrachtet werden (vgl. Abb. 12). Anschließend werden im dritten Schritt die identifizierten Merkmale mit den Fähigkeiten der jeweiligen Technologie gegenübergestellt, um abschließend im vierten Schritt auf dieser Basis die technische Machbarkeit zu bestimmen (Schindler 2014).

Reifegradbewertung

Der Begriff der Technologiereife wurde in der Literatur erstmals in Verbindung mit dem von Ford und Ryan (1981) entwickelten Konzept des TLZ erwähnt (vgl. Abb. 8). In diesem Kontext wird die Ausbreitung einer Technologie anhand definierter Entwicklungsstufen zeitlich eingeordnet (Ford und Ryan 1981). Abbildung 13 stellt die sechs Entwicklungsstufen von Ford und Ryan (1981) im TLZ dar.

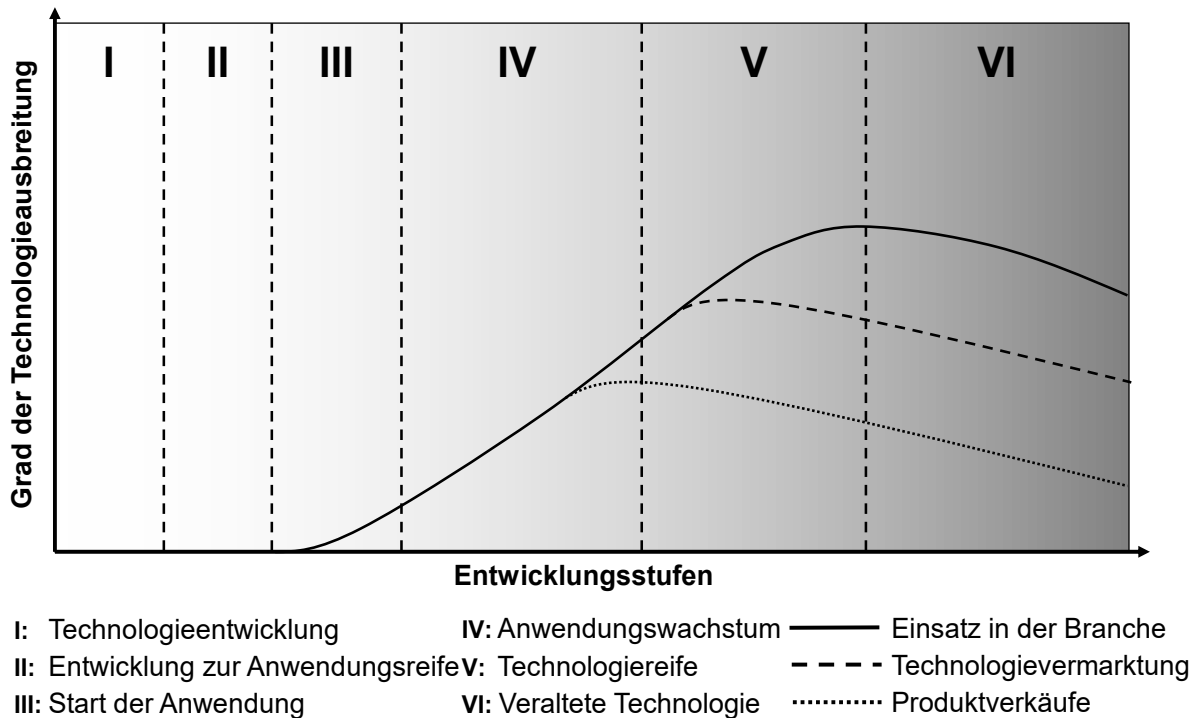


Abbildung 13: Technologielebenszyklus und enthaltene Entwicklungsstufen in Anlehnung an Ford und Ryan (1981, S. 120)

Die Technologiereife markiert in diesem Kontext die Phase V, wobei nur noch marginale Weiterentwicklungen zu erwarten sind (Ford und Ryan 1981). Ein wichtiges Kriterium zur Bewertung von Produktionstechnologien stellt der Technologiereifegrad (*engl.* Technology Readiness Level (TRL)) dar (Grunwald 2009). Die TRL, als erster systematischer Ansatz zur Bestimmung der Reife, bezeichnet eine von der US-amerikanischen Weltraumbehörde NASA gegründetes systematisches Messsystem (NASA 2016).

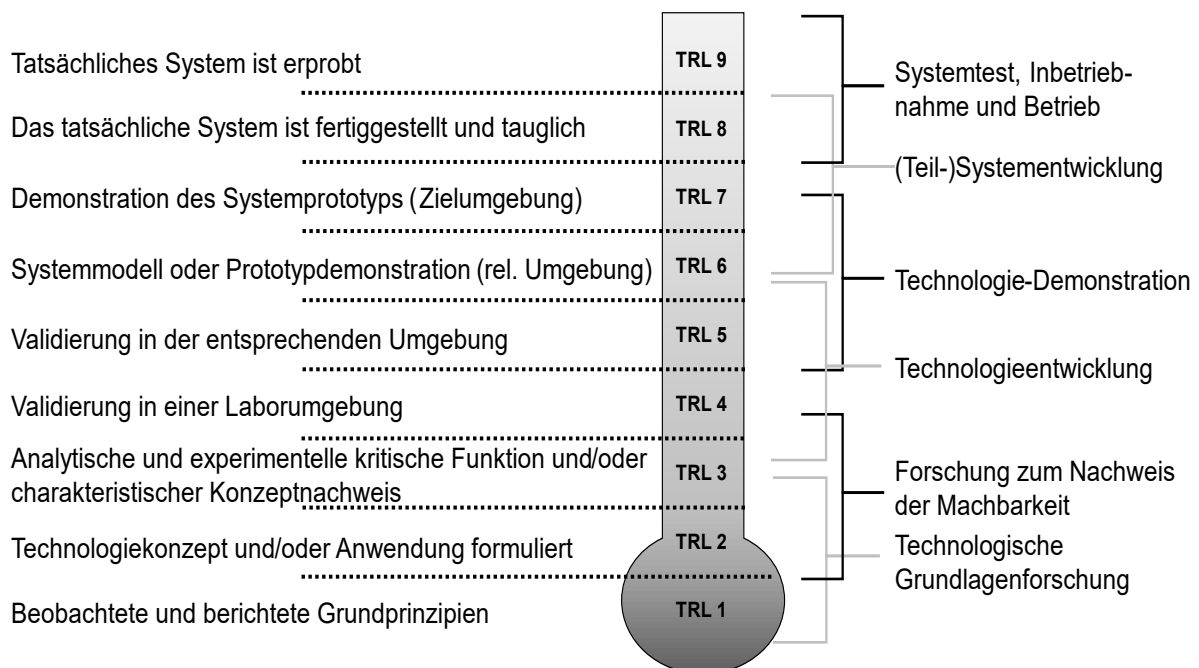


Abbildung 14: TRL-Skala in Anlehnung an NASA (2016, S. 251)

Abbildung 14 stellt die von der NASA entwickelte TRL-Skala dar. Die Bewertung der Reife bzw. des Entwicklungsstands einer Technologie unterstützt den konsistenten Vergleich der Reife zwischen verschiedenen Arten von Technologien (Mankins 1995). TRL beschreibt den Stand einer Technologie und dient als Basislinie, von der aus der Reifegrad gemessen und der Fortschritt definiert wird (NASA 2016). Die Skala des Messsystems besteht aus neun Phasen, wobei jede Phase durch das Bestehen spezifischer Test- und Demonstrationsanforderungen erreicht wird (Faidi und Olechowski 2020). In der Skala reichen die TRLs von Phase 1, der Grundlagenforschung bis Phase 9, dem Systemtest, Start und Betrieb (vgl. Abb. 14). Eine Technologie mit einem niedrigem TRL hat ein als hoch wahrgenommenes Risiko, während eine Technologie mit höherem TRL ein als niedrig wahrgenommenes Risiko aufweist (Engel et al. 2012). Normalerweise ist ein TRL von 6 (d. h. Technologie in einer relevanten Umgebung demonstriert) erforderlich, damit eine Technologie in einen System oder Prozess integriert werden kann (NASA 2016).

TRL 1 beschreibt die erste und niedrigste Phase der technologischen Reifung (vgl. Abb. 14). Hierbei wird die wissenschaftliche Forschung erstmals in angewandte Forschung und Entwicklung umgesetzt (Mankins 1995). Sobald die grundlegenden physikalische Eigenschaften beobachtet werden, können auf der Phase der TRL 2 praktische Anwendungen der Eigenschaften erfunden oder identifiziert werden (NASA 2016). Die Anwendung ist auf dieser Entwicklungsstufe spekulativ, da keine experimentellen Beweise oder detaillierten Analysen vorliegen, die die Vermutung untermauern könnten (Mankins 2009). In der Phase TRL 3 wird die aktive Forschung und Entwicklung eingeleitet. Dieser Prozess umfasst sowohl analytische Studien, um die Technologie in einen Kontext zu stellen, sowie Laborstudien, zur Überprüfung der Richtigkeit der analytischen Vorhersagen (NASA 2016). Derartige Studien und Experimente sollen eine Bestätigung der in TRL 2 formulierten Anwendungen umfassen (Mankins 1995).

Nach erfolgreicher Bestätigung müssen in TRL 4 die grundlegenden technologischen Elemente integriert werden, um festzustellen, dass die Komponenten zusammenarbeiten, um ein konzepttaugliches Leistungsniveau für ein Bauteil zu erreichen (NASA 2016). Die hier stattfindende Validierung muss darauf ausgerichtet sein, dass zuvor formulierte Konzept zu unterstützen, und sollte gleichzeitig den Anforderungen potentieller Systemanwendungen genügen (Straub 2015). In der TRL 5 Phase muss die Wiedergabetreue des zu prüfenden Bauteils deutlich erhöht sein (NASA 2016). Die grundlegenden technologischen Elementen müssen mit beinahe realistischen unterstützenden Elementen integriert werden, sodass die Gesamtanwendungen in einer simulierten oder realistischen Umgebung getestet werden können (Mankins 1995). In der Phase TRL 6 wird ein repräsentatives Modell oder ein Prototypsystem in einer relevanten Umgebung zur Überprüfung der Tauglichkeit der Technologie getestet (Straub 2015).

TRL 7 erfordert eine tatsächliche Demonstration des Systemprototypen in einer relevanten Umgebung (Mankins 1995). Der Prototyp sollte in der Nähe oder in der Größenordnung des geplanten operativen Systems sein (NASA 2016). Die treibenden Gründe für das Erreichen dieses Reifegrads bestehen darin, das Vertrauen in Systemtechnik und Entwicklung zu gewährleisten (Mankins 1995; NASA 2016). Nach Definition durchlaufen alle Technologien, die

in tatsächlichen Systemen eingesetzt werden, die Phase TRL 8 (Mankins 2009). In fast allen Fällen markiert diese Phase das Ende der Systementwicklung für die meisten Technologieelemente (Mankins 1995). Die Phase TRL 9 auf der NASA-Technologiereifegradskala repräsentiert den höchsten Reifegrad einer Technologie. Auf diesem Niveau hat die Technologie ihre Reife in der realen Welt erreicht und wird aktiv in operationellen Systemen eingesetzt, weshalb diese Phase den Übergang von der Entwicklungs- und Testphase zur Anwendung und Implementierung in voll funktionsfähigen Systemen markiert (Mankins 1995; NASA 2016).

Bei der Technologiebewertung stellt die TRL ein wichtiges Kriterium dar, welches in verschiedenen Prozessen und Modellen Anwendung findet (NASA 2016; Oztemel und Korkusuz Polat 2006; GAO 2020; ESA 2008; Brousseau et al. 2009). Brousseau et al. (2009) entwickelten als erste einen Ansatz zur Anwendung der TRL in Bezug zur Reifebestimmung von Produktionstechnologien, weshalb dieser Ansatz im Folgenden genauer erläutert wird. Hierbei wird die TRL in den von Autoren entwickelten Ansatz des Technology Maturity Assessment (TMA) übertragen und für die Bewertung von Micro- und Nanotechnologien eingesetzt (Brousseau et al. 2009). Der Ansatz umfasst sieben reduzierte TRL-Phasen, während durch die Verwendung von Fragebögen ein Reifeprofil erstellt wird, das die Forschungs- und Entwicklungsaufwände entlang einer Reifeskala für die TRL darstellt (Brousseau et al. 2009). Abbildung 15 zeigt ein beispielhaftes Reifegrad-Profil eines Mikrofertigungsprozess.

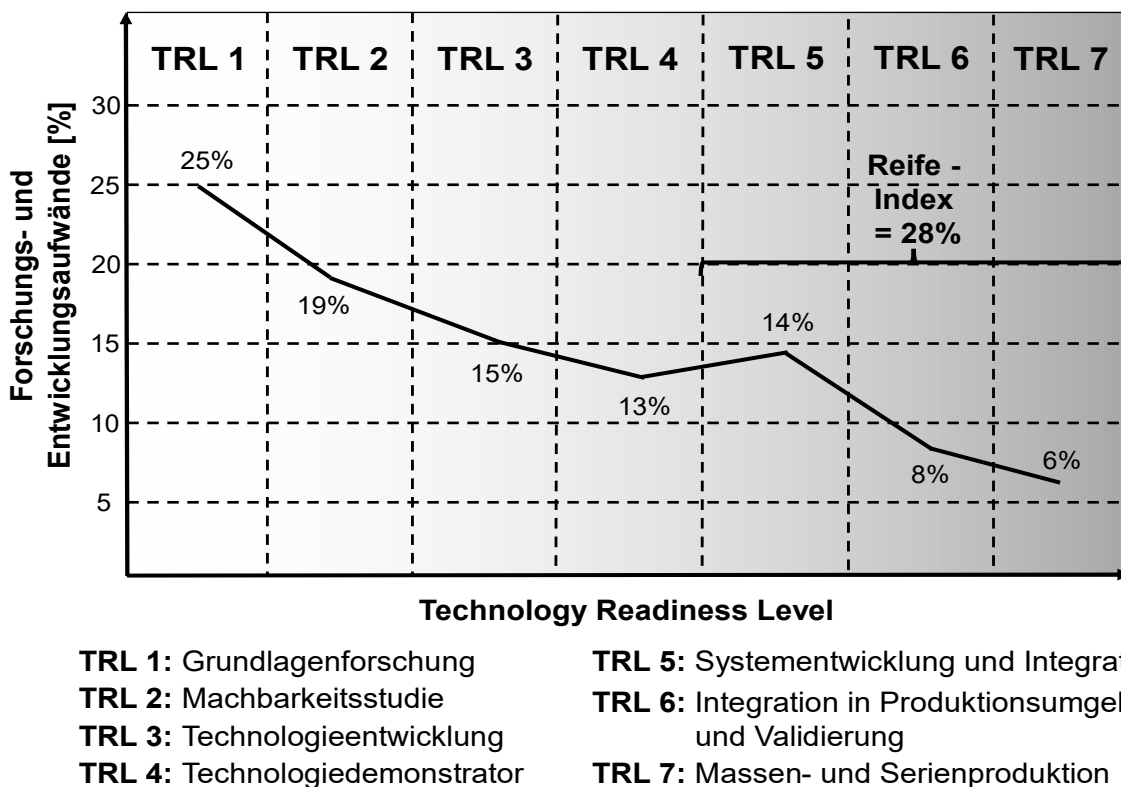


Abbildung 15: Beispielhafte Darstellung eines Reife-Profiles in Anlehnung an Schindler (2014, S. 49)

Zusätzlich zum Reifeprofil wird ein Reifeindex dargestellt, der die Vermarktbarkeit einer Technologie quantifiziert (Schindler 2014). Dieser Index wird als Summe der TRL 5 bis 7 berechnet.

Ein höherer Reifeindex deutet auf eine fortgeschrittenere Technologie hin und ermöglicht eine zuverlässigere Abschätzung des erfolgreichen Einsatzes (Brousseau et al. 2009). Ein weiteres Beispiel stellt die Bewertung der technologischen Bereitschaft (*engl.* Technology Readiness Assessment (TRA)) dar (vgl. Abb. 16).

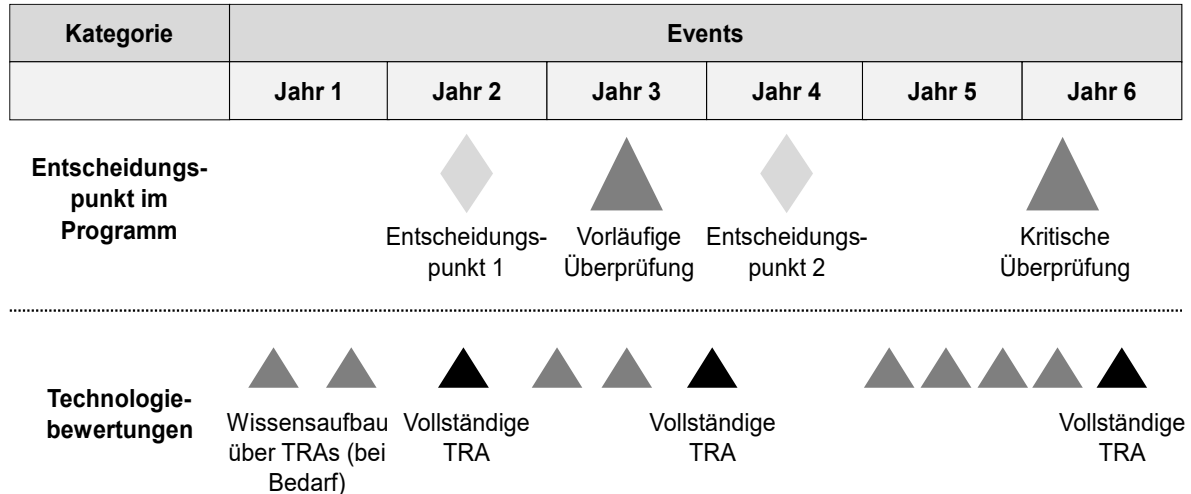


Abbildung 16: Fiktiver Programmplan mit eingebundenen TRAs in Anlehnung an GAO (2020, S. 23)

TRA bezeichnet einen systematischen, evidenzbasierten Prozess zur Bewertung der Reifegrade von kritischen Technologien, die für die Leistung eines größeren Systems oder die Erfüllung der Hauptziele eines Beschaffungsprogramms notwendig sind (Mankins 2009). Abbildung 16 zeigt, dass TRAs über mehrere Jahre vor wichtigen Entscheidungen herangezogen werden können. Wichtig ist zudem, vorher eine Wissensgrundlage zu schaffen, um die Qualität der TRAs zu erhöhen und das Potential geeigneter Technologien zu erkennen (Mankins 2009). Der Begriff kritische Technologien bezeichnet neue bzw. neuartige Technologien und darüber hinaus Technologien, die für die Anwendung in Systemen in einem neuen Kontext genutzt werden (GAO 2020). Das TRA nutzt in diesem Zusammenhang die TRL als Schlüsselmaßstab zur Bewertung (Mankins 2009). Ein Hauptziel der TRA besteht darin, die Herausforderungen Leistung, Zeitplan und Finanzierung bei der Entwicklung neuer Systeme zu bewältigen (Mankins 2009). Für eine gezielte Anwendung werden TRAs in Technologieprogramme integriert (GAO 2020). In Technologieprogrammen wird dargestellt, an welchen Stellen TRAs im Verhältnis zu wichtigen Entscheidungspunkten durchgeführt werden (Mankins 2009). Ein Beispiel für die Integration von TRA in einen fiktiven Programmplan ist in Abbildung 16 gegeben.

Zusammenfassend stellt die Reifegradbewertung von Produktionstechnologien einen wichtigen Prozess dar, um den Entwicklungsstand und die Einsatzfähigkeit neuer Technologien in der Produktion zu beurteilen. Dieser Bewertungsansatz zielt darauf ab, den Reifegrad einer Technologie entlang eines definierten Rahmens oder einer Skala zu bestimmen.

Potentialbewertung

In der Literatur existieren zahlreiche Definitionen des Potentials (Reminger 1990; Bullinger 1996; Schindler 2014; Schönmann et al. 2018). Gemäß Reminger (1990) umfasst das

Potential einer Technologie sowohl die Risiken als auch die Chancen, um Wettbewerbsvorteile zu erlangen (Reminger 1990). Bullinger (1996) betont die Aussicht auf die Verbesserung von Produkteigenschaften durch den Einsatz vielversprechender Technologien (Bullinger 1996). Des Weiteren betont er die Reduzierung von Durchlaufzeiten und Kosten, was sich positiv auf die Produktivität auswirkt (Bullinger 1996). Schindler (2014) definiert in seiner Arbeit das Technologiepotential als diejenige Fähigkeit und Eigenschaft einer Technologie, die einen wesentlichen technologischen Nutzen bei deren Anwendung bringt (Schindler 2014). Die Definition hat Ähnlichkeiten mit der Definition aus Sicht der Leistungsfähigkeit (Schönmann et al. 2018). Aus der Sicht der Ressourcen- und fähigkeitsorientierten Leistungsfähigkeit bezeichnet der Begriff Technologiepotential die Option, neue oder existierende Produkte mit modifizierten Bauteilmerkmalen (z. B. Bauteilgeometrie) oder -funktionen (z. B. verbesserte Oberflächen-güte) herzustellen (Schönmann et al. 2018).

Schindler (2014) und Schönmann et al. (2018) entwickelten jeweils ein Vorgehen zur Potentialbewertung und legten den Fokus auf Produktionstechnologien. Beim Vorgehen von Schindler (2014) werden technologische Leistungsparameter zur Abbildung des Technologiepotentials verwendet. Das Vorgehen zur Bestimmung des Technologiepotentials basierend auf Schindler (2014) ist in Abbildung 17 dargestellt, welches im Folgenden zum Verständnis des Vorgehens bei einer Potentialbewertung beschrieben wird.

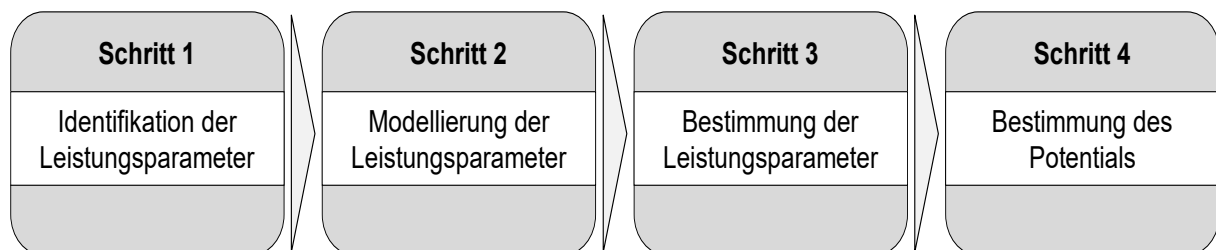


Abbildung 17: Konzeptionelles Vorgehen zur Bestimmung des Technologiepotentials in Anlehnung an Schindler (2014, S. 74)

Zu Beginn erfolgt die Identifikation der Leistungsparameter, die die Eigenschaften und Fähigkeiten der Technologie in Bezug auf das zu fertigende Produkt beschreiben (Schindler 2014). Die Informationen werden durch informelle Quellen wie z. B. Interviews mit Technologieexperten oder Netzwerken gewonnen. Aus der identifizierten Menge sind anschließend die für das Technologiepotential relevanten Leistungsparameter zu bestimmen (Schindler 2014). Im zweiten Schritt erfolgt die Modellierung der Leistungsparameter, die daraufhin im dritten Schritt konkretisiert und gewichtet werden (Schindler 2014). Abschließend wird anhand der Kategorien Flexibilität, Produktqualität und neue Produkteigenschaften sowie den aggregierten Leistungsparametern das Technologiepotential ermittelt (Schindler 2014). Das Vorgehen basiert ausschließlich auf dem Nutzenpotential einer Technologie, während das Marktpotential nicht berücksichtigt wird. Ein ähnliches Vorgehen haben Schönmann et al. (2018) entwickelt. Hierbei wird anhand eines Fragebogens eine Auswahl an qualitativen und quantitativen Bewertungskriterien aus der Literatur vorgenommen (Schönmann et al. 2018). Die Bewertungskriterien werden anschließend in Hauptgruppen sowie Untergruppen eingeteilt (vgl. Abb. 18).

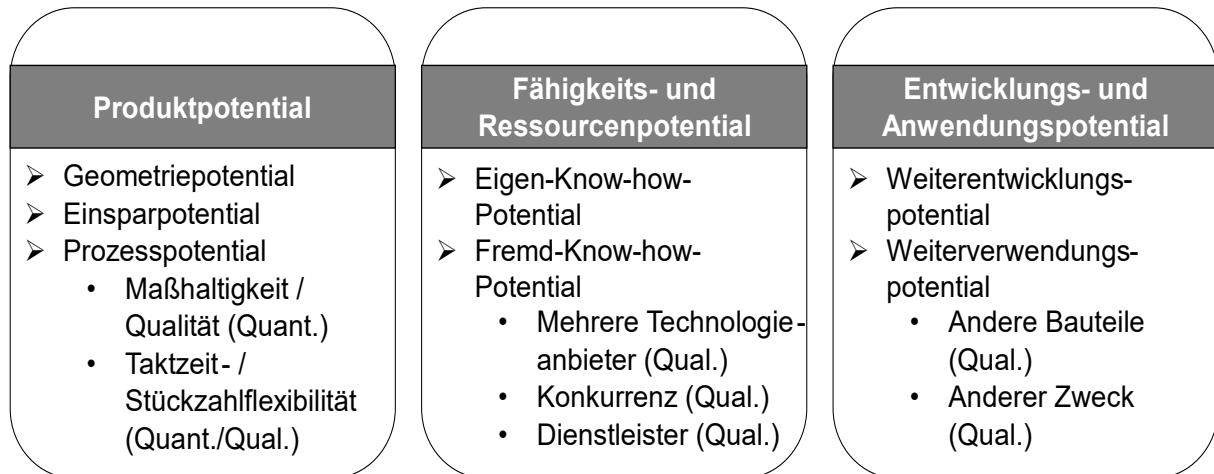


Abbildung 18: Bewertungskriterien für das Leistungspotential in Anlehnung an Schönmann et al. (2018, S. 8)

In diesem Kontext werden die qualitativen Kriterien durch die Angabe des Grades der Zustimmung (z. B. [1: trifft nicht zu], ... , [100: trifft vollständig zu]) bewertet und gewichtet (Schönmann et al. 2018). Die Bewertung der quantitativen Kriterien erfolgt basierend auf einer Formel zur aktuellen Ausprägung sowie dem strategischen Zielwert eines Kriteriums (Schönmann et al. 2018). Jeder Bewertung wird zudem ein Sicherheitsfaktor aus vier Sicherheitsstufen zugeordnet, welcher einer Varianz bzw. Standardabweichung gleicht (Schönmann et al. 2018). Anschließend kann das Technologiepotential mit den einzelnen Gewichtungen und Bewertungen der Kriterien determiniert werden (Schönmann et al. 2018). Abschließend erfolgt eine Monte Carlo Simulation, um aus den sicheren und unsicheren Werten einen aggregierten Wert für das Potential einer Produktionstechnologie abzuleiten (Schönmann et al. 2018). Im Kontext der Ansätze zur Bestimmung und Bewertung des Potentials werden stets verschiedene Perspektiven auf eine Technologie beleuchtet, wobei in der Regel die technischen und wirtschaftlichen Komponenten hervorgehoben werden (Hofer et al. 2021). Darüber hinaus ist die strategische Bewertungsperspektive von Bedeutung (Schönmann et al. 2018). Diese zielt auf die Bewertung des Strategischen Fits einer Technologie und der zukünftigen Eignung für die strategische Ausrichtung eines Unternehmens ab (Hofer et al. 2019). Hofer et al. (2021) stellen einen Ansatz für eine umfassende Einschätzung des Technologiepotentials dar, der alle relevanten Bewertungsperspektiven (technisch, wirtschaftlich und strategisch) angemessen berücksichtigt und vergleichbar abbildet (Hofer et al. 2021).

Zusammenfassend bilden die Kriterien für die Bewertung von Produktionstechnologien ein weitreichendes Themengebiet mit vielen unterschiedlichen Ansätzen und Bewertungskriterien. Die grundlegenden Kriterien unterscheiden sich in qualitative und quantitative Messgrößen, d. h. solche, die anhand von Einschätzungen festgelegt werden können und die wirklich messbar sind. In diesem Kontext beeinflussen die Kriterien die vier großen Bewertungen der Wirtschaftlichkeit unter Unsicherheit, der technischen Machbarkeit, des Reifegrades und des Potentials einer Produktionstechnologie. Bestehende Modelle zur Bewertung von Produktionstechnologien fokussieren zumeist eine Bewertung des Status quo in Form des Reifegrades (Hofer et

al. 2021). Dafür kommen verschiedene Reifegradmodelle zum Einsatz (NASA 2016; Brousseau et al. 2009; Schindler 2014). Die Evaluationskriterien für Produktionstechnologien bestehen aus einer Trinität von Ebenen, die ökonomische, technologische und strategische Aspekte umfassen. Auf der ökonomischen Ebene steht die Beurteilung der Rentabilität und Effizienz einer Technologie im Fokus. Die technologische Ebene konzentriert sich auf die Leistungsfähigkeit, Zuverlässigkeit und Innovationsfähigkeit der Technologie. Hierbei werden Faktoren wie beispielsweise Qualitätsmerkmale und Flexibilität detailliert betrachtet. Die strategische Ebene betrachtet die langfristige Ausrichtung der Technologie im Kontext der übergeordneten Unternehmensziele. In diesem Kontext werden Schlüsselfragen der Marktanpassung, der Zukunftsfähigkeit und der strategischen Positionierung eingehend analysiert. Die Integration dieser drei hierarchischen Ebenen in die Bewertungskriterien ermöglicht eine umfassende und ausgewogene Beurteilung von Produktionstechnologien. Im Folgenden Abschnitt wird auf die Technologiebewertung in der Batteriezellproduktion eingegangen.

2.4 Technologiebewertung in der Batteriezellproduktion

Der folgende Abschnitt befasst sich mit einer kurzen Einführung in das Themengebiet der Batteriezellproduktion sowie der Darstellung der Technologiebewertung in der Batteriezellenproduktion. Angesichts der kontinuierlich steigenden Nachfrage nach Elektrofahrzeugen und Energiespeicherlösungen hat sich die Batteriezellproduktion zu einem essentiellen Bestandteil der globalen Wirtschaft entwickelt (VDMA Batterieproduktion et al. 2023). Einhergehend mit dieser Entwicklung ist eine ständige Forschung im Hinblick auf neuartige und potentielle Technologien verbunden, um die Herausforderungen bezüglich Kosten, Effizienz und Nachhaltigkeit zu bewältigen (Liu et al. 2021). Angesichts dieses Kontextes stellt eine umfassende technologische Bewertung eine grundlegende Voraussetzung dar, um die Wettbewerbsfähigkeit auf dem Markt zu erhalten. Der Herstellungsprozess von Lithium-Ionen-Batteriezellen umfasst drei Hauptstadien: die Herstellung der Elektroden, die Zellenassemblierung und die Zellenfertigstellung (Heimes et al. 2018). Abbildung 19 zeigt den Herstellprozess einer Batteriezelle.

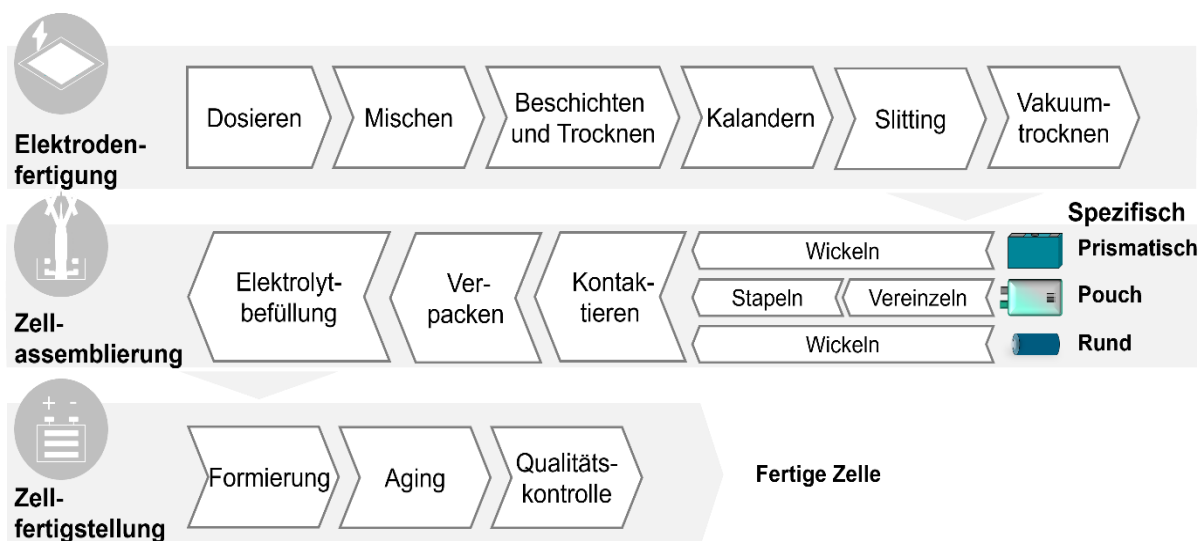


Abbildung 19: Herstellungsprozess einer Batteriezelle in Anlehnung an VDMA Batterieproduktion et al. (2023, S. 111)

Bei der Herstellung der Elektroden werden Rohmaterialien zu einer Suspension gemischt, die daraufhin verarbeitet wird, um Elektroden zu erzeugen (Heimes et al. 2018). Während der Zellenmontage werden Elektroden, Separator und Elektrolyte zusammengebaut, um die Grundeinheit der Zelle zu bilden. Die Zellenfertigung umfasst Prozesse wie die Formierung und Aging, um die Leistung der Zelle zu optimieren (Heimes et al. 2018). Zudem werden Qualitätskontrollmaßnahmen während des gesamten Herstellungsprozesses implementiert, um die Zuverlässigkeit und Effizienz der Batteriezellen sicherzustellen (Heimes et al. 2018).

Die Technologiebewertung in der Batteriezellproduktion ist geprägt von mehreren Aspekten. Einerseits besteht ein gesellschaftliches Bewusstsein für den Klimawandel und den Mangel an fossilen Ressourcen (Bognar et al. 2018). Andererseits ist noch nicht entschieden, welche Technologien im Produktionsprozess in den nächsten Jahren für die Anwendung im Automobilbereich vorherrschen werden (VDMA Batterieproduktion et al. 2023; Bognar et al. 2018). Diese technologischen Fragen werden durch wirtschaftliche Entscheidungen beeinflusst und führen zu einer Vielfalt von Produktvarianten, der Entwicklung unterschiedlicher Batteriezellendesigns und Alternativen in der Produktionstechnologie (Liu et al. 2021). Um das hohe Tempo an technologischen Innovationen und Veränderungen in der Branche zu bewältigen, müssen kontinuierlich neuartige Technologien bewertet und unreife bzw. bedrohte Technologien frühzeitig erkannt werden (Bognar et al. 2018).

3 Grundlagen der Validierung

Das Kapitel erstreckt sich auf zwei Abschnitte. In Abschnitt 3.1 werden relevante Definitionen zur Validierung sowie zur Validierung von Modellen dargestellt. Im Unterabschnitt Kriterien und Standards für Validierung werden Anforderungen an Validierung beschrieben und erläutert. In Unterabschnitt 3.1.2 werden relevante Arten und Techniken von Validierung aus der Literatur dargestellt. Anschließend wird in Abschnitt 3.2 Validierung im Kontext der Technologiebewertung dargestellt und die Schnittstellen beschrieben bzw. die Anwendung von Validierung bei der Technologiebewertung erläutert.

3.1 Validierung von Modellen

Validierung wird in der wissenschaftlichen Literatur unterschiedlich definiert (Norm ISO 9000 2015; Friedenthal et al. 2008; Gass 1983; Sargent 2014). Die ISO (2015) liefert eine allgemeine Definition von Validierung. In diesem Kontext wird Validierung definiert als die Bestätigung durch die Bereitstellung objektiver Nachweise, dass die Anforderungen für eine beabsichtigte Verwendung oder Anwendung erfüllt wurden (Norm ISO 9000 2015). Eine Definition der Validierung von Modellen liefern Friedenthal et al. (2008), Gass (1983) und Sargent (2014). Friedenthal et al. (2008) definiert Validierung von Modellen als einen Prozess sicherzustellen, dass das Modell, das Fachgebiet oder das interessierende korrekt repräsentiert (Friedenthal et al. 2008). Gass (1983), der aus der Perspektive der Operationsforschung schreibt, beschreibt Validierung von Modellen als eine Prüfung der Übereinstimmung eines Modells und seiner Ergebnisse mit der wahrgenommenen Realität (Gass 1983). Sargent (2014) beschreibt Validierung von Modellen als einen Nachweis, dass ein computerisiertes Modell innerhalb seines Anwendungsbereichs über einen zufriedenstellenden Genauigkeitsbereich verfügt, der mit der beabsichtigten Anwendung des Modells übereinstimmt (Sargent 2014).

Validierung bezieht sich somit darauf, das Maß der Übereinstimmung zwischen dem Verhalten des Systems und den Ausgaben des Modells zu testen (Gass 1983). Dies umfasst die Feststellung, ob die Theorien und Annahmen, die das Modell unterstützen, korrekt sind und ob die Darstellung der Realität durch das Modell vernünftig ist (Gass 1983). Dabei wird sichergestellt, dass die vom Modell verwendeten Daten ausreichend sind und die Umsetzung des Modells korrekt und fehlerfrei ist (Friedenthal et al. 2008). Ein weiteres Prinzip der Validierung von Modellen ist somit die Glaubwürdigkeit des Modells zu steigern, damit die Benutzer Vertrauen in die Nützlichkeit des Modells gewinnen (Gass 1983). Darüber hinaus muss Validierung unter Berücksichtigung des Zwecks des Modells durchgeführt werden. Modelle werden für einen spezifizierten Zweck erstellt, und die Validität wird im Kontext dieses Zweckes festgestellt (Sargent 2014). Validierung ist ein schrittweiser Prozess, der durchgeführt wird, bis ein ausreichendes Vertrauen besteht, dass das Modell valide ist (Sargent 2014). Vor diesem Hintergrund wird Validierung als eine Frage des Grades der Glaubwürdigkeit eines Modells betrachtet. Zusammenfassend bildet Validierung einen entscheidenden Schritt, um das Vertrauen in die Ergebnisse oder die Leistung eines Systems oder Prozesses zu gewährleisten.

In der Fachliteratur zur Validierung von Modellen wird Validierung häufig in Zusammenhang mit dem Begriff der Verifikation genutzt (Sargent 2014; Balci 1998). Gemäß der Unterscheidung zwischen den Begriffen Verifikation und Validierung (V&V) wird Verifikation mit der Frage, ob das Modell richtig ist und Validierung mit der Frage, ob es das richtige Modell ist in Verbindung gebracht (Balci 1997). Hier bezieht sich die Verifikation auf die Überprüfung der Korrektheit des Modells selbst sowie auf die Korrektheit der Transformation aus einem anderen Modell konzentriert (Sargent 2013). Im Gegensatz dazu zielt Validierung darauf ab, die Eignung des Modells in Bezug auf die spezifische Aufgabenstellung zu überprüfen und sicherzustellen, dass es den untersuchten Unternehmensbereich angemessen abbildet (Balci 1997). Dieser Ansatz ermöglicht eine präzise und umfassende Bewertung sowohl der inneren Konsistenz des Modells sowie seiner Anwendbarkeit für die zugrunde liegende Problemstellung. Weiter gedacht bildet Validierung somit einen unverzichtbaren Prozess in verschiedenen Bereichen, der darauf abzielt, die Effektivität, Genauigkeit und Zuverlässigkeit von Modellen, Prozessen oder Methoden zu gewährleisten (Rabe et al. 2008).

Charakteristisch für sowohl die Korrektheit und gleichermaßen die Eignung der Modelle ist die Schwierigkeit des vollständigen Nachweis (Balci 1998). Das Ziel einer durchgeführten V&V liegt daher nicht im vollständigen und formalen Nachweis der Validität, sondern in der Bestätigung ihrer Glaubwürdigkeit (Gerberich 2011). Diese Glaubwürdigkeit hängt von der Akzeptanz durch die beteiligten Personen ab (Rabe et al. 2008). Im folgenden Abschnitt werden verschiedene Kriterien für Validierung betrachtet.

3.1.1 Kriterien für Validierung

Validität bezieht sich auf alle Aspekte eines Testprozesses, angefangen bei der Definition des Konstrukts über die Konzeption des Tests bis hin zur Bewertung der Folgen der Testanwendung (Lane 2023). In diesem Zusammenhang bezieht sich Validität auf das Ausmaß, in dem theoretische, logische und empirische Beweise die Interpretationen, Entscheidungen, Verwendungen von Testergebnissen bestätigen sowie die daraus resultierenden Konsequenzen (Kane 2001). Diese Aspekte können auf die Modellebene übertragen werden. Bezogen auf Modelle wird bei der Validierung das Modell mit dem realen Originalsystem verglichen (Balci et al. 2002). In diesem Prozess wird überprüft, ob das Modell das Verhalten des Originals präzise und fehlerfrei wiedergibt (Yin und McKay 2018). Darüber hinaus wird gewährleistet, dass das Modell gemäß dem zuvor definierten Modellierungszweck konzipiert wurde (Yin und McKay 2018). Validierung beantwortet folglich die Frage, ob das Modell für die spezifische Aufgabe angemessen ist (Hofmann 2020). Validierung für die Modellentwicklung kann sich auf die folgenden Kriterien beziehen (Leeflang et al. 2014):

- die Modellstruktur (Spezifikation)
- die Datenqualität
- die Schätzungsmethode
- die Anwendbarkeit von statistischen Tests (z.B. im Hinblick auf die Annahmen zum Fehlerterm)
- die Übereinstimmung der Modellergebnisse mit den theoretischen und vernünftigen Erwartungen

- die Leistung des Modells im Vergleich zu alternativen Modellen
- die Relevanz der Modellergebnisse für die beabsichtigte Verwendung

Zur Überleitung von der Modellebene auf die Ebene der Bewertungsmodelle wird im Folgenden in Anlehnung an die oben genannten Kriterien die im Paper von Noh et al. (2017) dargestellten Anforderungen an ein valides Bewertungsmodell näher beschrieben und erläutert. In dem Paper werden die folgenden Anforderungen an ein valides Bewertungsmodell skizziert (Noh et al. 2017):

1. Die Fähigkeit des Modells, den Wert entsprechend dem Zweck der Bewertung genau zu messen.
2. Die Berücksichtigung dreier wesentlicher Bereiche - Ontologie, Referenz und Kausalität - zur gründlichen Bewertung der Validität eines Bewertungsmodells.
3. Die Anwendung von Theorien der Validität zur Gewährleistung der Genauigkeit und Wirksamkeit des Bewertungsprozesses.

Der zweite Punkt basiert auf der Arbeit im Themengebiet Validierung von Borsboom et al. (2004). Bei Betrachtung der Literatur unterscheidet sich die von den Autoren vorgeschlagene Konzeption der Validität von anderen existierenden Theorien der Validität in mehreren wesentlichen Punkten (Noh et al. 2017). Das Konzept legt den Schwerpunkt auf Ontologie, Referenz und Kausalität, während andere Theorien sich auf Epistemologie, Bedeutung und Korrelation konzentrieren (Borsboom et al. 2004). Diese Verlagerung des Schwerpunkts bedeutet eine Abkehr von der traditionellen Betonung der Beziehung zwischen dem gemessenen Attribut und anderen Attributen (Noh et al. 2017). In diesem Kontext wird die Aufmerksamkeit auf die Prozesse, die die Wirkung des gemessenen Attributs auf die Testergebnisse vermitteln, gelenkt. Abbildung 20 stellt den Rahmen zur Verbesserung der Validität eines Bewertungsmodells dar.

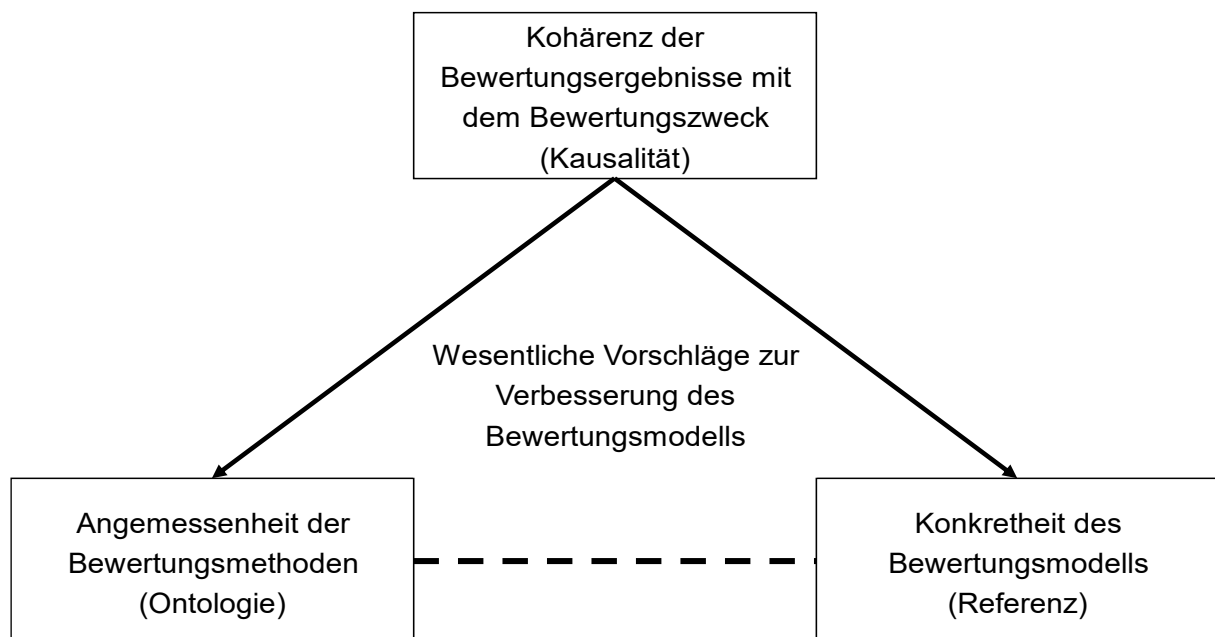


Abbildung 20: Rahmen zur Verbesserung der Validität eines Bewertungsmodells in Anlehnung an Noh et al. (2017, S. 4)

Dies markiert eine fundamentale Neuausrichtung des Konzepts der Validität, indem es sich von einer ausschließlich epistemologischen und korrelativen Perspektive abwendet und stattdessen einer eher ontologischen und kausalen Betrachtungsweise zuwendet (Borsboom et al. 2004). Die Autoren beschreiben das Konzept der Ontologie auf einem Verständnis der Natur des zu messenden Attributs und seiner Beziehung zum Messprozess (Borsboom et al. 2004). Noh et al. (2017) charakterisiert die Ontologie als integralen Bestandteil der Validität von Bewertungsmodellen, wobei der Fokus darauf liegt sicherzustellen, dass das Messsystem von Beginn an korrekt konzipiert wird (Noh et al. 2017). Dies beinhaltet weiterführende Untersuchungen, um zu überwachen, ob die erwarteten Ergebnisse mit den tatsächlichen Beobachtungen kohärent sind (Noh et al. 2017). Ein valides Messsystem sollte die Nutzer in die Lage versetzen, dasjenige zu erfassen, was das Ziel objektiv repräsentiert, unabhängig von vorherigem Wissen über das Ziel (Kimberlin und Winterstein 2008). In diesem Kontext wird die Überprüfung der Angemessenheit der angewandten Bewertungsmethode angestrebt, um sicherzustellen, dass sie hinreichend geeignet ist, um die beabsichtigten Messgrößen präzise zu erfassen (Kimberlin und Winterstein 2008). Zudem soll das menschliche Denkvermögen bei der Entwicklung von Bewertungskriterien und -methoden berücksichtigt werden zur Vermeidung von Unsicherheiten (Noh et al. 2017).

Borsboom et al. (2004) beschreiben die Referenz als eine weitere wichtige Komponente in der von ihnen vorgeschlagenen Konzeption der Testvalidität (Borsboom et al. 2004). Hier argumentieren sie, dass das Attribut in der Realität präsent sein muss, damit der durchgeführte Test als valide Methode zur Messung dieses Attributs betrachtet werden kann (Borsboom et al. 2004). In Bezug auf die Validität von Bewertungsmodellen ist die Auswahl angemessener Attribute, welche beispielsweise die Charakteristika einer Technologie beschreiben, von erheblicher Bedeutung (Yin und McKay 2018). Die Referenz bezieht sich somit auf die Konkretheit eines Bewertungsmodells (Noh et al. 2017). Der Ansatz von Noh et al. (2017) konzentriert sich darüber hinaus darauf zu prüfen, ob eine Auswahl an Kriterien, die aus mehreren Indikatoren besteht, dem MECE-Prinzip entspricht, um die Integrität der Bewertungskriterien zu gewährleisten (Noh et al. 2017). Das MECE-Prinzip besagt, dass jede Kategorie oder Gruppierung von Elementen eindeutig voneinander abgegrenzt sein sollte (*Mutually Exclusive*, zu Deutsch: *Gegenseitige Ausschließlichkeit*) und alle relevanten Optionen oder Elemente in definierten Kategorien enthalten sein sollen (*Collectively Exhaustive*, zu Deutsch: *Gemeinschaftlich Erschöpfend*) (Ang und Tang 1975). Dadurch wird die Bewertung der Technologie aus verschiedenen Perspektiven und auf der Grundlage eines Bewertungszwecks ermöglicht (Noh et al. 2017). Die Prüfung der Validität misst dahingehend die Angemessenheit von Schlussfolgerungen, die auf der Grundlage von Messergebnissen gezogenen Rückschlüsse für das theoretische Konstrukt (Noh et al. 2017).

Nach Borsboom et al. (2004) ist die Kausalität ein grundlegender Aspekt für die Validität eines Tests (Borsboom et al. 2004). Sie argumentieren, dass ein Test für die Messung eines Attributs valide ist, wenn die Variation des Attributs die Variation des Testergebnisses verursacht (Borsboom et al. 2004). Die Validierung eines Tests hängt somit von der kausalen Beziehung zwischen dem gemessenen Attribut und den resultierenden Testergebnissen ab. Noh et al. (2017) übertragen diesen Gedanken und heben die Notwendigkeit hervor, die Kohärenz der

Bewertungsergebnisse mit dem Bewertungszweck zu prüfen (Noh et al. 2017). Im Kontext von Modellen bedeutet dies, dass ein valides Bewertungsmodell in der Lage sein sollte, zukünftige Auswirkungen oder Ergebnisse auf der Grundlage seiner Bewertungsergebnisse zu schätzen (Noh et al. 2017). Die Diskrepanzen in den Messergebnissen sollen durch Varianzen in den zugrundeliegenden Attributen erklärt werden; wenn jedoch Attributunterschiede keine kausale Rolle bei der Generierung der Messergebnisse spielen, wird das betreffende Messverfahren als ungültig betrachtet (Phillips 1997). Daher ist die Kohärenz der Bewertungsergebnisse mit dem Bewertungszweck die wichtigste und grundlegendste Voraussetzung für ein valides Modell (Noh et al. 2017). Sobald diese Kohärenzbedingung erfüllt ist, können die beiden anderen Anforderungen (Angemessenheit der Bewertungsmethoden und Konkretheit des Bewertungsmodells) geprüft werden, um Möglichkeiten zur Verbesserung der Effizienz und Effektivität des Modells zu ermitteln.

Zusammenfassend bilden die drei wesentlichen Kriterien zur Validierung die Kohärenz der Bewertungsergebnisse mit dem Bewertungszweck (Kausalität), die Angemessenheit der Bewertungsmethoden (Ontologie) und die Konkretheit des Bewertungsmodells (Referenz). Die Kohärenz nimmt eine Position an der Spitze des hierarchischen Gefüges ein, da die Validität eines Modells zwangsläufig in Frage gestellt wird, wenn dessen intendierter Zweck nicht adäquat erfüllt werden kann (Landry et al. 1983). Die übrigen Kriterien sind darauf ausgerichtet, die Möglichkeiten zur Effizienz- und Effektivitätssteigerung des Modells zu untersuchen, um die Glaubwürdigkeit zu erhöhen (Noh et al. 2017). Im Folgenden werden verschiedene Arten von Validierung beschrieben.

3.1.2 Arten von Validierung

In diesem Abschnitt werden verschiedene Arten der Validierung beschrieben und erläutert. Darüber hinaus werden Aspekte der V&V näher erläutert und auf Klassifizierungsansätze für V&V-Techniken eingegangen, die in der Literatur existieren.

In der Literatur existieren verschiedene Arten von Validierung (Sargent 1982; Landry et al. 1983; Gass 1983). Sargent (1982) identifiziert in seinem Paper vier zentrale Aspekte der Validierung: die Datenvalidierung, die konzeptionelle Modellvalidierung, die computerbasierte Modellvalidierung und die operationale Validierung (Sargent 1982). Die Aspekte werden zudem von Landry (1983) aufgegriffen und in einen Modellvalidierungsprozess integriert (Landry et al. 1983). Der Modellvalidierungsprozess nach Landry (1983) stellt die Modellentwicklung und Modellvalidierung in einem schrittweisen und iterativen Prozess dar (Landry et al. 1983). Abbildung 21 stellt den Modellvalidierungsprozess dar.

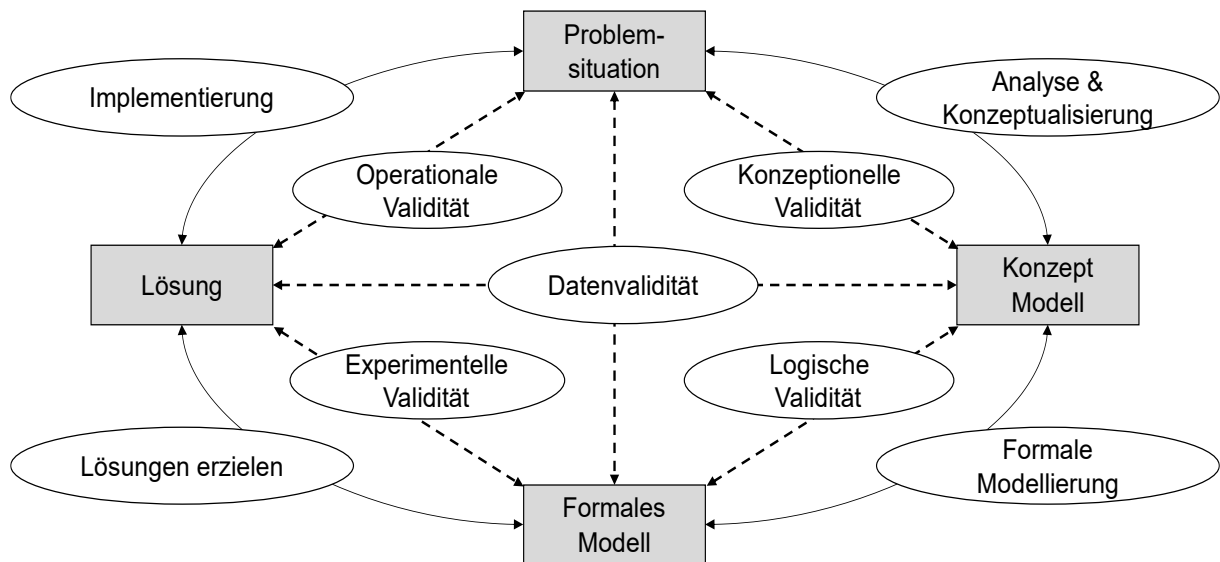


Abbildung 21: Der Modellvalidierungsprozess in Anlehnung an Landry et al. (1983, S. 212)

Der Prozess besteht aus verschiedenen Phasen. Dazu zählen die Problembeschreibung, das konzeptionelle Modell, das formale Modell sowie die Lösungen und Empfehlungen (vgl. Abb. 21). Datenvalidität zielt darauf ab, die Genauigkeit und Angemessenheit der verwendeten Daten sicherzustellen sowie die korrekte Durchführung von Datenmanipulationen zu gewährleisten (Sargent 1982). Dies schließt die Einhaltung bewährter Verfahren für die Datensammlung, die Überprüfung von Daten auf Beziehungen und Korrelationen sowie die Identifizierung und Bereinigung von Ausreißern ein (Sagasti und Mitroff 1973). Die konzeptionelle Validität konzentriert sich auf die Theorien und Annahmen, die der Struktur, Logik und den Beziehungen im Modell zugrunde liegen (Landry et al. 1983). Um diese Annahmen zu überprüfen, kommen mathematische und statistische Analysen zum Einsatz (Sagasti und Mitroff 1973). Dies umfasst Aspekte wie Linearität, Unabhängigkeit und die Anpassung von Wahrscheinlichkeitsverteilungen an die vorliegenden Daten (Sargent 1982).

Im Rahmen der experimentellen Validität wird die Qualität und Effizienz des Lösungsmechanismus untersucht (Landry et al. 1983). Dieser Aspekt konzentriert sich auf die Art der erzielbaren Lösungen, differenziert zwischen expliziten und impliziten Lösungen aus formalen Modellen und betrachtet die Effizienz bei der Erreichung dieser Lösungen (Sagasti und Mitroff 1973). Des Weiteren wird die Empfindlichkeit der Lösungen gegenüber Veränderungen in den Werten der Modellparameter analysiert (Sargent 1982). Die logische Validität bezieht sich auf das Ausmaß, in dem das formale Modell die Kapazität aufweist, die Problemstellung gemäß der Definition im konzeptuellen Modell korrekt und präzise zu beschreiben (Landry et al. 1983). Unter Operative Validität wird die Beurteilung der Genauigkeit der Modellausgaben im Kontext des beabsichtigten Anwendungszwecks bezeichnet (Sargent 1982). Dieser Aspekt involviert einen umfassenden Vergleich der Modellergebnisse mit dem tatsächlichen Verhalten des Systems (Sagasti und Mitroff 1973). Methoden wie statistische Tests und Sensitivitätsanalysen werden angewandt, um sicherzustellen, dass die Modellvorhersagen den realen Bedingungen und Anforderungen der vorgesehenen Anwendung entsprechen (Landry et al. 1983). Die

Evaluierung bietet eine fundierte Grundlage für die Beurteilung der Leistungsfähigkeit und Anwendbarkeit des Modells in konkreten operationellen Szenarien (Landry et al. 1983).

Um die Sicherheit bei der Entwicklung zu gewährleisten, sollten die Prozesse der Modellentwicklung und der Modellvalidierung aus Managementsicht in einen einzigen Prozess integriert werden (Landry et al. 1983). Die Modellvalidierung ist in vier grundlegende, miteinander verbundene und iterative Stadien unterteilt (vgl. Abb. 21). Der Modellvalidierungsprozess beginnt mit einer Problemsituation (vgl. Abb. 21). Dies kann beispielsweise die Unzufriedenheit in der Anwendung eines Bewertungsmodells sein. In diesem Kontext wird die Problemsituation stark durch die Wahrnehmungen und das Verhalten der Akteure definiert (Landry et al. 1983). Unter dem konzeptionellen Modell wird das kohärente mentale Abbild der Problemsituation, das durch die Wahrnehmungen und Werturteile sowohl der Modellbauer und zudem der Entscheidungsträger geprägt wird, verstanden (Gass 1983). Das konzeptionelle Modell gibt den Ansatz für die zu verfolgenden Ziele, die relevanten Elemente der Problemsituation und das Aggregationsniveau der einbezogenen Elemente an. Darüber hinaus wird die Beziehungen zwischen den relevanten Elementen sowie die Zielgruppe und den Grund für die Formulierung des Modells angegeben (Landry et al. 1983).

Formale Modelle sind eine Darstellung des konzeptionellen Modells in mathematischen Symbolen, Computer-Sprachen oder einer Kombination aus beidem (Yin und McKay 2018). Hier wird das Ziel verfolgt, Lösungen für Probleme zu finden oder die Formulierung von Empfehlungen zu generieren (Yin und McKay 2018). Die Lösung kann als das Resultat des Prozesses der Modellierung und Validierung betrachtet werden (Gass 1983). Sie wird durch Anwendung der verfügbaren Lösungstechniken und Verfahren aus dem formalen Modell abgeleitet (Landry et al. 1983). Durch den Einsatz von beispielsweise analytischen Ansätzen aus der Wahrscheinlichkeitstheorie sind die Modellentwickler in der Lage, die Gültigkeit und Genauigkeit ihrer Modelle zu überprüfen, indem sie Vorhersagen mit experimentellen Daten vergleichen oder das Verhalten des Systems unter verschiedenen Bedingungen analysieren (Mayer und Butler 1993). Die erzielte Lösung dient als Grundlage für Empfehlungen zur Bewältigung des am Anfang definierten Problems (Yin und McKay 2018).

Gass (1983) etabliert neun eigenständige Dimensionen der Validität, darunter technische, operative, dynamische und soziale Validität (Gass 1983). Bei der technischen Validität werden die Annahmen des Modells identifiziert und bewertet (Gass 1983). Dies umfasst u. a. Aspekte wie Modell-, Daten-, logisch-mathematische- und prädiktive Validität (Gass 1983). Die Modellvalidität reflektiert die graduelle Übereinstimmung zwischen dem konzipierten Modell und der tatsächlichen Systemrealität (Sargent 2013). Ein weiterer Aspekt ist die Datenvalidität, die sicherstellt, dass die unbehandelten und zudem die manipulierten Dateninputs akkurat, objektiv und repräsentativ sind (Landry et al. 1983). In diesem Kontext spielt die logisch-mathematische Validität eine Schlüsselrolle, indem sie sich mit der systematischen Überführung des Modells in ein Computerprogramm befasst und somit eine valide Implementierung sicherstellt (Gass 1983). Die prädiktive Validität analysiert präzise die Diskrepanzen zwischen den vorhergesagten Modellausgaben und den tatsächlichen Beobachtungen des realen Systems (Kaplan et al.

2007). Die Analyse quantifiziert nicht nur die Fehler, sondern betrachtet darüber hinaus ihre Dimensionen, Ursprung und die potentielle Möglichkeit ihrer Korrektur (Kaplan et al. 2007).

Als weitere Dimension bezeichnet die Operative Validität die Bewertung der Auswirkungen identifizierter Fehler auf den Gesamtkontext (Sargent 2013). Die Umsetzungsvalidität untersucht die Analogie zwischen den Reaktionen des realen Systems auf Eingaben und den Modellempfehlungen (Gass 1983). Bei der dynamischen Validität wird festgelegt wie das Modell über seinen Lebenszyklus hinweg aufrechterhalten wird, einschließlich Zeitpunkt und Methoden zur Aktualisierung der Parameter sowie dem Verfahren zur Identifikation von Erfolgen und Misserfolgen des Modells (Heffernan et al. 2019). Die soziale Validität konzentriert sich auf die Akzeptanz des Modells durch relevante Stakeholder und die Wahrnehmung seiner Nützlichkeit und Relevanz in der realen Anwendungspraxis (Carter und Wheeler 2019). Diese umfassende Bewertung verschiedener Validierungsbereiche gewährleistet eine ganzheitliche Überprüfung der Modelleistung und -relevanz (Gass 1983).

Ergänzend zu den Arten von Validierung werden die Grundaspekte sowie Klassifizierungsansätze von V&V vorgestellt. Das Grundkonzept der V&V hat seinen Ursprung in der Softwareentwicklung (Balci 1998). Im Rahmen dieses Kontexts liegt der Fokus auf der Qualitätskontrolle des erstellten Programmcodes unter Berücksichtigung verschiedener Qualitätsmerkmale wie Vertrauenswürdigkeit, Sicherheit, Effizienz und Kompatibilität (Quadri und Farooq 2010). Die Ansätze der V&V in der Softwareentwicklung können auf die V&V in der Modellierung übertragen werden (Rabe et al. 2008). Durch die Anwendung von V&V kann die Glaubwürdigkeit eines Modells gesteigert werden, indem Fehler effektiv identifiziert und korrigiert werden können (Lehmann und Wang 2019; Rabe et al. 2008). V&V-Techniken ermöglichen die Überprüfung verschiedener Aspekte von V&V (Balci 1998). Die Auswahl geeigneter V&V-Techniken gestaltet sich schwierig, da kein allgemein gültiges Vorgehensmodell existiert (Sargent 2013). Zudem ist die korrekte Durchführung einer V&V bei einer spezifischen Aufgabenstellung oftmals ein Problem für die Anwender, da eine umfassende Kenntnis der V&V-Techniken und ihrer Eigenschaften eine wesentliche Grundlage für die korrekte Durchführung darstellen (Rabe et al. 2008).

Balci (1998) listet in seinem Beitrag gängige Techniken auf und kategorisiert diese in die vier Kategorien: informell, formell, statisch und dynamisch (Balci 1998). Rabe et al. (2008) führen darüber hinaus eine Vielzahl praktikabler Techniken auf, die speziell für die Simulation im Bereich der Logistik geeignet sind (Rabe et al. 2008). Im Folgenden wird die Gruppierung von Balci (1998) näher beschrieben.

Informelle Methoden zählen zu den am häufigsten verwendeten Methoden von V&V (Carson 2002). Der Begriff informell wird verwendet, da die Ansätze stark von menschlichen Überlegungen und Subjektivität geprägt sind und keinen strengen mathematischen Formalismus aufweisen (Balci 1997). Die Anwendung dieser Methoden erfolgt durch den Einsatz strukturierter Ansätze unter Einhaltung formaler Richtlinien (Balci 1997). Unter optimalen Bedingungen erweisen sich diese Verfahren als äußerst effektiv (Borenstein 1998).

Balci (1998) beschreibt statische Techniken als Methoden zur Genauigkeitsbewertung, die auf den Merkmalen des statischen Modellentwurfs und des Quellcodes basieren (Balci 1998). Diese Techniken erfordern keine maschinelle Ausführung des Modells, sondern können durch mentale Ausführung durchgeführt werden (Rabe et al. 2008). Für statistische Techniken stehen viele automatisierte Tools zur Verfügung, weshalb sie sehr beliebt und weit verbreitet sind (Brade 2000). Sie können verschiedene Informationen über die Struktur des Modells, angewendete Modellierungstechniken und -praktiken, Daten- und Kontrollfluss innerhalb des Modells sowie syntaktische Genauigkeit erlangen (Balci 1997).

Dynamische Techniken werden als Methoden zur Bewertung des Verhaltens eines Modells auf Grundlage seiner Ausführung beschrieben (Balci 1997). Die Techniken erfordern die Ausführung des Modells und sind darauf ausgerichtet das Modell basierend auf seinem Ausführungsverhalten zu bewerten (Balci 1998). Bei den meisten dynamischen V&V-Techniken ist eine Modellinstrumentierung erforderlich, bei der zusätzliche Elemente in das ausführbare Modell eingefügt werden, um Informationen über das Verhalten des Modells während der Ausführung zu sammeln (Balci 1997). In der Regel werden dynamische Verifikations- und Validierungstechniken in einem dreistufigen Prozess angewendet. Im ersten Schritt erfolgt die Instrumentierung des ausführbaren Modells (Brade 2000). Anschließend wird im zweiten Schritt das instrumentierte Modell ausgeführt, damit abschließend im dritten Schritt die Ausgaben des Modells analysiert werden, um das dynamische Verhalten zu bewerten (Balci 1998).

Formale Techniken werden als V&V-Techniken beschrieben, die auf mathematischen Beweisen der Korrektheit basieren (Rabe et al. 2008). Sofern erreichbar, gilt der Beweis der Korrektheit als das effektivste Mittel der V&V von Modellen (Carson 2002; Rabe et al. 2008). Aktuelle Techniken des Korrektheitsbeweises auf dem neuesten Stand der Technik sind nicht in der Lage, auf selbst hinreichend komplexe Modelle angewendet zu werden (Brade 2000). Formale Techniken fungieren dahingehend als grundlegende Basis für andere Methoden der V&V (Balci 1997).

Im vorliegenden Abschnitt wurden diverse Aspekte der Validierung umfassend erörtert, wobei u. a. auf Aspekte der V&V sowie verschiedene zugehörige Techniken eingegangen wurde. Die Fachliteratur dokumentiert eine Vielfalt von Validierungstypologien, wobei Autoren unterschiedliche Schwerpunkte setzen. Diese Schwerpunkte erfassen Aspekte wie die Übereinstimmung zwischen Modell und Realität, Genauigkeit der Dateninputs sowie die Analyse von Diskrepanzen zwischen vorhergesagten und beobachteten Modellausgaben. V&V, ursprünglich aus der Softwareentwicklung stammend, trägt zur Glaubwürdigkeitssteigerung in der Modellierung bei, indem Fehler identifiziert und behoben werden. Balci (1998) kategorisiert V&V-Techniken in informell, formell, statisch und dynamisch. Informelle Techniken basieren auf menschlichen Überlegungen und Subjektivität, während statische Techniken die Genauigkeit auf Basis des statischen Modellentwurfs bewerten. Dynamische Techniken bewerten das Verhalten während der Modellausführung und erfordern häufig eine Instrumentierung und Analyse der Modellausgaben. Formale Techniken basieren auf mathematischen Beweisen der Korrektheit und erweisen sich als effektiv, wenn sie anwendbar sind. Im folgenden Abschnitt wird die Anwendung von Validierung im Kontext der Technologiebewertung betrachtet.

3.2 Validierung im Kontext der Technologiebewertung

Die bisherigen Forschungen zum Themenbereich Technologiebewertung zeigen zahlreiche Verfahren zur Technologiebewertung in der Literatur auf (vgl. Abschnitt 2.3). Um eine effektive Anwendung sicherzustellen, müssen die Verfahren den sich ändernden internen und externen Umgebungen beispielsweise durch regulatorische Anforderungen angepasst werden. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist in diesem Zusammenhang die stetige Überprüfung der Validität der Verfahren zur Technologiebewertung, um die Effizienz und Effektivität zu verbessern (vgl. Unterabschnitt 3.1.1). Bei Betrachtung der Forschung in diesem Themenbereich, konzentriert sich die Mehrheit der bisherigen Ansätze auf die Entwicklung von Modellen, während nur wenige deren Umsetzung oder Verbesserung fokussieren (Noh et al. 2017). Um diese Forschungslücke zu betrachten, widmet sich der Abschnitt den systematischen Ansätzen zur Überprüfung der Validität im Kontext der Technologiebewertung. In Unterabschnitt 3.1.1 wurden schon Kriterien für die Validität von Bewertungsmodellen aus der Literatur dargestellt. Im Folgenden werden die Thematik und der Zusammenhang zwischen Validierung und Technologiebewertung näher erläutert. Dafür wird der Begriff Verfahren als synonym für Modell verwendet.

Die vorangegangenen Forschungsanstrengungen im Zusammenhang mit der Nutzung eines Technologiebewertungsverfahrens lassen sich in zwei Kategorien unterteilen: die Modellentwicklung eines geeigneten Verfahrens und die Umsetzung des Verfahrens (Noh et al. 2017). Die Modellentwicklung bezieht sich auf Aktivitäten, um zu entscheiden was und wie Technologien bewertet werden sollen, um den Evaluierungszweck in einem gegebenen Kontext zu erreichen (ex-ante Bemühungen) (Noh et al. 2017). Andererseits bezieht sich die Umsetzung auf die Anwendung des entwickelten Modells in der Praxis und umfasst Aktivitäten zur Untersuchung des Evaluierungsprozess und der Ergebnisse, in dem Bestreben, das Modell zu verbessern (ex-post Bemühungen) (Noh et al. 2017).

Von besonderem Interesse ist die Entwicklung des Verfahrens, da jegliche nachfolgende Anwendung ohne ein valides Verfahren nicht zielführend wäre (Gass 1983). Die praktische Anwendung eines Technologiebewertungsverfahrens kann eine Herausforderung im Management darstellen und unvorhergesehene Ergebnisse hervorbringen, selbst wenn das Verfahren auf der Basis wissenschaftlicher Literatur und Daten sorgfältig ausgearbeitet wurde (Noh et al. 2017). So können beispielsweise falsche Ursache-Wirkungs-Beziehungen angenommen werden, welche zu einer fehlerhaften Auswahl geeigneter Bewertungskriterien für das Verfahren führen. Zudem sind Änderungen der internen und externen Umgebungseinflüsse, wie die Veränderung der Innovationspolitik eines Unternehmens, maßgeblich für die Beeinflussung der Validität des Verfahrens mitverantwortlich (Lane 2023). Vor diesem Hintergrund ist es von großer Wichtigkeit die Validität des Verfahrens kontinuierlich zu testen, um Maßnahmen zu definieren (Grunwald 2009). Nach Noh et al. (2017) ist ein Verfahren valide, wenn es die drei Aspekte Kausalität, Ontologie und Referenz erfüllt (vgl. Abb. 20). Im Kontext der Technologiebewertung erfordert dies, dass die angewandte Bewertungsmethode adäquat konzipiert sein sollte, um präzise diejenigen Aspekte zu erfassen, die ihrem Messzweck entsprechen (Noh et al. 2017). Die Referenz ist gegeben, wenn die Indikatoren für die Bewertungskriterien sich

gegenseitig ausschließen und erschöpfend für den Zweck der Gesamtbewertung sind (vgl. Unterabschnitt 3.1.1).

Eine Schwierigkeit bei der Validierung von Technologiebewertungsverfahren besteht darin, dass die Evaluierung von Technologien je nach dem Zweck einer gegebenen Bewertung auf verschiedene Arten durchgeführt werden kann (McCabe und Dixon 2000). Aufgrund der Diversität der Bewertungsverfahren gestaltet sich die Durchführung einer angemessenen Validierung der Verfahren als herausfordernd (Haag et al. 2010). Um die bestehenden Ansätze von Technologiebewertungen zusammenzufassen, betrachten Noh et al. (2017) in ihrem Paper zwei wesentliche Kernelemente der Verfahren: zum einen wird betrachtet, was im Zuge einer Technologiebewertung bewertet werden soll und zum anderen, wie bewertet werden soll (Noh et al. 2017). Das erstgenannte Kernelement bezieht sich auf das vorgegebene Evaluierungsziel, wobei herausgestellt wird, dass verschiedene Zwecke der Technologiebewertung unterschiedliche Perspektiven in Bezug auf die Technologien erfordern (Noh et al. 2017). Die Wahl der Perspektive (z. B. strategisch oder ökonomisch) bei der Bewertung von Technologien ist von dem jeweiligen Evaluierungszweck abhängig (Grunwald 2009). In diesem Kontext ist die Validierung auf das Evaluierungsziel abzustimmen, um sicherzustellen, dass die angewendeten Methoden der Validierung die relevanten Aspekte der zu bewertenden Technologie angemessen erfassen und beurteilen (Noh et al. 2017)

Das zweite Kernelement bezieht sich auf die Bewertungsverfahren. Hierbei wird zwischen qualitativen und quantitativen bzw. hybriden Verfahren unterschieden (vgl. Abschnitt 2.2). Qualitative Verfahren werden trotz ihrer Limitationen in Bezug auf die Reliabilität und Validität angewendet, da sich mit diesen Verfahren alle weicheren Aspekte der technologiebezogenen Faktoren leicht erfassen lassen (Haag et al. 2010). Im Gegensatz dazu bieten quantitative Verfahren Daten und liefern numerische Klarheit (Haag et al. 2010). Dazu zählen u. a. komplexe mathematische Modelle, Scoring-Modelle basierend auf multikriteriellen Entscheidungsanalysen, Entscheidungsfindungsanalysen und heuristische Algorithmen (Noh et al. 2017). Basierend auf der Vorgehensweise bei der Bewertung von Technologien sind unterschiedliche Vorgehensweisen bei der Validierung der Verfahren zu wählen (Noh et al. 2017).

Ein zentraler Fokus bei der Validierung von Technologiebewertungsverfahren ist die Überprüfung ihrer Gültigkeit anhand von empirischen Daten (Wieringa 2014). Technologiebewertungsverfahren dienen der Analyse der Eignung, Leistung und Auswirkungen von Technologien in unterschiedlichen Kontexten (vgl. Abschnitt 2.2). Zahlreiche wissenschaftliche Untersuchungen unterstreichen die Notwendigkeit der Überprüfung der Genauigkeit solcher Verfahren (Kotte 2017; Kröll 2007; Noh et al. 2017; Pfeiffer und Weiß 1995). Ferner umfasst Validierung von Technologiebewertungsverfahren die kritische Überprüfung der fundamentalen Annahmen und Parameter, die in der Modellentwicklung eingeflossen sind (Noh et al. 2017). Validierung und Technologiebewertung sind daher untrennbar miteinander verbundene Prozesse, die eine Schlüsselrolle bei der Konzipierung und Implementierung neuer Technologien spielen (Yin und McKay 2018). Die Anwendung von Validierungsmethoden ist in diesem Zusammenhang besonders wichtig in sicherheitskritischen Bereichen wie der Medizin, Pharma- und Luftfahrtindustrie, wo fehlerhafte Einschätzungen von Technologien schwerwiegende Konsequenzen

zen haben können (Cardoso et al. 2021; Banta 2009). Zusammenfassend ist Validierung neben ihrer primären Funktion, die Glaubwürdigkeit eines Technologiebewertungsverfahrens zu überprüfen, insbesondere innerhalb der Verfahrensentwicklung von großer Wichtigkeit. Sie trägt dazu bei, dass die verwendeten Verfahren glaubwürdiger und effizienter gestaltet sind, um präzise Bewertungen und Prognosen zu liefern.

Die bisherigen Bemühungen der Validierung von Technologiebewertungsverfahren zeigen deutlich, dass weiterer Forschungsbedarf in diesem Themengebiet notwendig ist. Deutlich wird angesichts der Vielfalt an Technologiebewertungsverfahren und der Tatsache, dass viele davon unerprobt sind, dass eine sorgfältige Validierung dieser Verfahren von entscheidender Bedeutung ist (Carson, 2002; Hall, 2002; Rabe et al., 2008; Haag et al., 2010). Diese Notwendigkeit ergibt sich aus der Komplexität und Dynamik technologischer Innovationen, die eine kontinuierliche Anpassung und Weiterentwicklung von Bewertungsmethoden erfordern (Schönmann et al. 2018). Ein grundlegendes Problem der ungenauen Validierung von Technologiebewertungsverfahren ist die mangelhafte Datenlage, beispielsweise von Testdaten, historischen Daten, Referenzdaten, echten Messungen und Beobachtungen von implementierten Technologien, Daten zur Verfahrensentwicklung, Validierungsstudien oder Feedback von Anwendern (Noh et al. 2017; Rabe et al. 2008).

Zusammenfassend zeigt die Analyse der Literatur zur Technologiebewertung und Validierung, dass trotz des breiten Spektrums an vorhandenen Verfahren eine beträchtliche Unsicherheit hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit und Effektivität besteht. Nur einzelne Literaturen, wie beispielsweise das Paper von Noh et al. (2017), beschäftigen sich mit der Validierung von Technologiebewertungsverfahren. Der größere Fokus der Literatur ist auf die Validierung von Simulationsmodellen gerichtet (Balci 1998; Sargent 2013; Rabe et al. 2008). Um dieser Herausforderung zu begegnen, ist es unerlässlich, dass zukünftige Forschungsbemühungen verstärkt darauf abzielen, die Validität und Zuverlässigkeit von Technologiebewertungsverfahren zu verbessern. Nur durch eine solide methodische Grundlage können fundierte Entscheidungen im Hinblick auf die Einführung und Nutzung neuer Technologien getroffen werden. Vor diesem Hintergrund ist eine Auseinandersetzung mit den in der Literatur existierenden Validierungsmethoden unerlässlich, um Unternehmen einen Weg aufzuzeigen, wie sie diese effektiv zur Validierung eines Technologiebewertungsverfahrens anwenden können. Dahingehend werden in den folgenden Kapiteln zwei zentrale Fragestellungen untersucht. Einerseits wird betrachtet, welche Methoden der Validierung für die Bewertung eines Technologiebewertungsverfahrens geeignet sind. Andererseits wird, basierend auf der ersten Frage, untersucht, wie eine geeignete Methode der Validierung für ein Technologiebewertungsverfahren ausgewählt werden kann. Diese Arbeit stellt somit einen ersten Schritt in der Betrachtung der Schnittstelle zwischen Technologiebewertung und Validierung dar.

4 Methodisches Vorgehen in der Arbeit

Im folgenden Kapitel wird die Methodik zur Auswahl einer geeigneten Validierungsmethode erläutert. Dazu wird in einem ersten Schritt das methodische Vorgehen für die Methodik vorgestellt. Anschließend werden anhand der vorgestellten Methodik die Schritte nacheinander angewendet. Um geeignete Validierungsmethoden für Technologiebewertungsverfahren zu identifizieren, wird eine systematische Literaturrecherche durchgeführt. Im Folgenden wird dafür die Methode von vom Brocke et al. (2009) angewendet, welche sich in der Literatur als gängige Methode etabliert hat (vom Brocke et al. 2009). Vom Brocke et al. (2009) beschreiben einen strukturierten Ansatz für die systematische Literaturrecherche, der sich in fünf Phasen gliedert (vgl. Abb. 22).

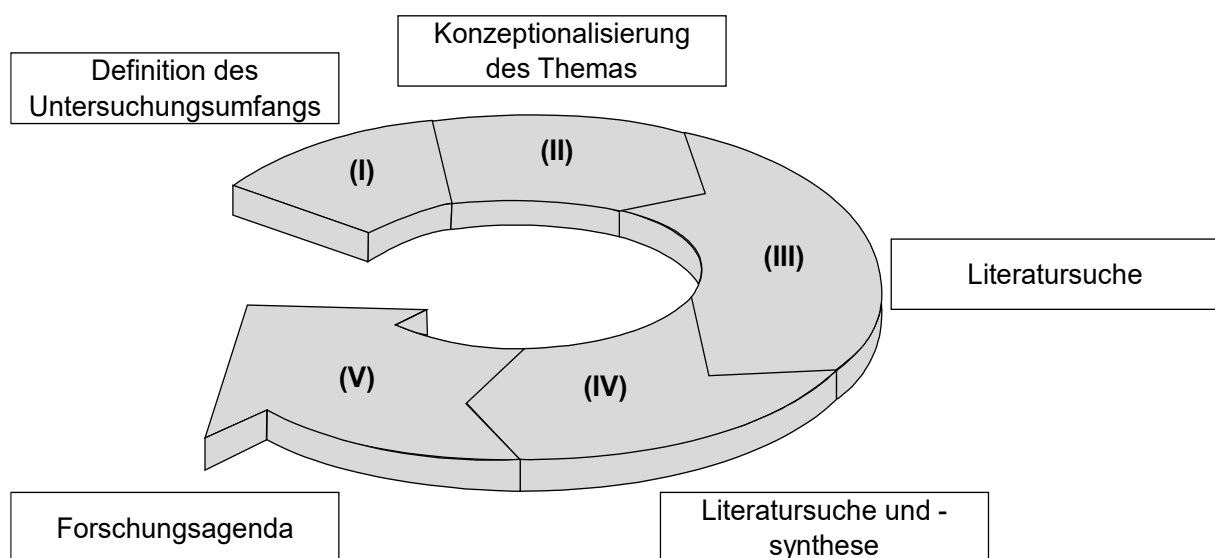


Abbildung 22: Vorgehen zur systematischen Literaturrecherche in Anlehnung an vom Brocke et al. (2009)

In der ersten Phase erfolgt die Definition der Forschungsfrage und des Forschungsumfangs (vgl. Abb. 22). Vom Brocke et al. (2009) empfehlen in diesem Zusammenhang beispielsweise die Anwendung der Taxonomie nach Cooper. Die zweite Phase des Vorgehens umfasst die Erstellung eines Konzepts für das Thema oder die Forschungsfrage. In dieser Phase werden relevante Schlüsselwörter, Datenbanken sowie Kriterien für Ein- und Ausschlussentscheidung festgelegt (vom Brocke et al. 2009). Die dritte Phase ist der Literatursuche gewidmet. Hier werden die ausgewählten Datenbanken durchsucht, um relevante Literaturquellen zu identifizieren (vom Brocke et al. 2009). In der vierten Phase erfolgt die Literaturanalyse und -synthese der gefundenen Literatur. Diese Phase umfasst eine kritische Analyse der identifizierten Quellen sowie die Zusammenführung der Erkenntnisse, um einen umfassenden Überblick über den Forschungsstand zu erhalten (vom Brocke et al. 2009). Die abschließende fünfte Phase konzentriert sich auf die Zusammenfassung der Ergebnisse und die Erstellung eines Ausblicks für die zukünftige Forschungsrichtung. In dieser Phase findet die Synthese der erlangten Erkenntnisse und ihre Bewertung in Bezug auf die ursprüngliche Forschungsfrage statt (vom Brocke

et al. 2009). Darüber hinaus wird eine Perspektive für mögliche weitere Forschungsaktivitäten skizziert (vom Brocke et al. 2009). Dieser strukturierte Ansatz ermöglicht eine methodische Durchführung der Literaturanalyse, um valide und aussagekräftige Ergebnisse zu erzielen (vom Brocke et al. 2009).

Als zweiter Schritt wird für die Konzeptionierung einer Entscheidungsunterstützung für die Auswahl geeigneter Validierungsmethoden für Technologiebewertungsverfahren im Hauptteil dieser Arbeit die Technik eines Ablaufdiagramms in Kombination mit einem morphologischen Kasten angewendet. Die Kombination eines Ablaufdiagramms und eines morphologischen Baukastens kann eine effektive Methode sein, um komplexe Prozesse oder Systeme zu analysieren und zu verstehen (Ensmenger 2016). Ablaufdiagramme sind visuelle Darstellungen eines Prozesses, die in der Softwareentwicklung und anderen Bereichen verwendet werden, um die Schritte in einem festgelegten Arbeitsablauf zu veranschaulichen (Ensmenger 2016). Dabei werden standardisierte Symbole und Pfeile verwendet, um die Abfolge der Schritte sowie den Fluss von Informationen im Prozess darzustellen (Ensmenger 2016). Ablaufdiagramme stellen in wissenschaftlichen Kontexten bedeutende Instrumente dar, die dazu dienen, komplexe Prozesse klar und visuell zu planen, zu analysieren und zu kommunizieren (Ensmenger 2016). In dieser Arbeit wird ein vereinfachtes Ablaufschema verwendet, um den Prozess zur Auswahl einer geeigneten Validierungsmethode darzustellen.

Der morphologische Kasten wurde im Jahr 1996 von dem schweizerisch-amerikanischen Astrophysiker Fritz Zwicky entwickelt (Kaufmann 2021). Es handelt sich um eine systematisch-analytische Kreativitätstechnik der Ideenfindung, bei der zahlreiche Faktoren unterschiedlicher Art durch Kombination miteinander in Beziehung gesetzt werden können (Kaufmann 2021). Um eine Lösung zu entwickeln, wird das Problem in Teilprobleme zerlegt, für die Einzellösungen gesucht werden. Aus den Teillösungen werden neue Gesamtlösungen gebildet (Kaufmann 2021).

Das genutzte sukzessive Vorgehen leitet sich von der Vorgehensweise bei der Erstellung eines morphologischen Kastens ab und beinhaltet folgende Schritte (Freitag 2020):

1. Definieren von Anforderungen und Randbedingungen an das zu entwickelnde Konzept
2. Analyse der Gestaltungsfaktoren und Aufteilung der unabhängigen Merkmale, Faktoren oder Parameter (Attribute) eines Gesamtproblems in Problemelemente sowie Auflistung in einer Tabelle
3. Lösungssuche der Teilprobleme und Auflistung in der Tabelle
4. Erarbeitung der Ausprägungen der Teilprobleme
5. Analyse und Auswahl der bestmöglichen Lösung

Als dritter Schritt erfolgt die Anwendung des Ablaufschemas in Kombination mit dem morphologischen Kasten anhand eines Fallbeispiels. Dafür wird ein Technologiebewertungsverfahren für Produktionstechnologien aus der Literatur für die Validierung des Konzepts herangezogen. Als Fallbeispiel für eine Technologie wird ein Beispiel aus der Batteriezellproduktion betrachtet. Basierend auf der Anwendung des Konzepts wird dieses validiert und Schlussfolgerungen

bezüglich der Anwendbarkeit diskutiert. Das methodische Vorgehen ist zusammenfassend in Abbildung 23 dargestellt.

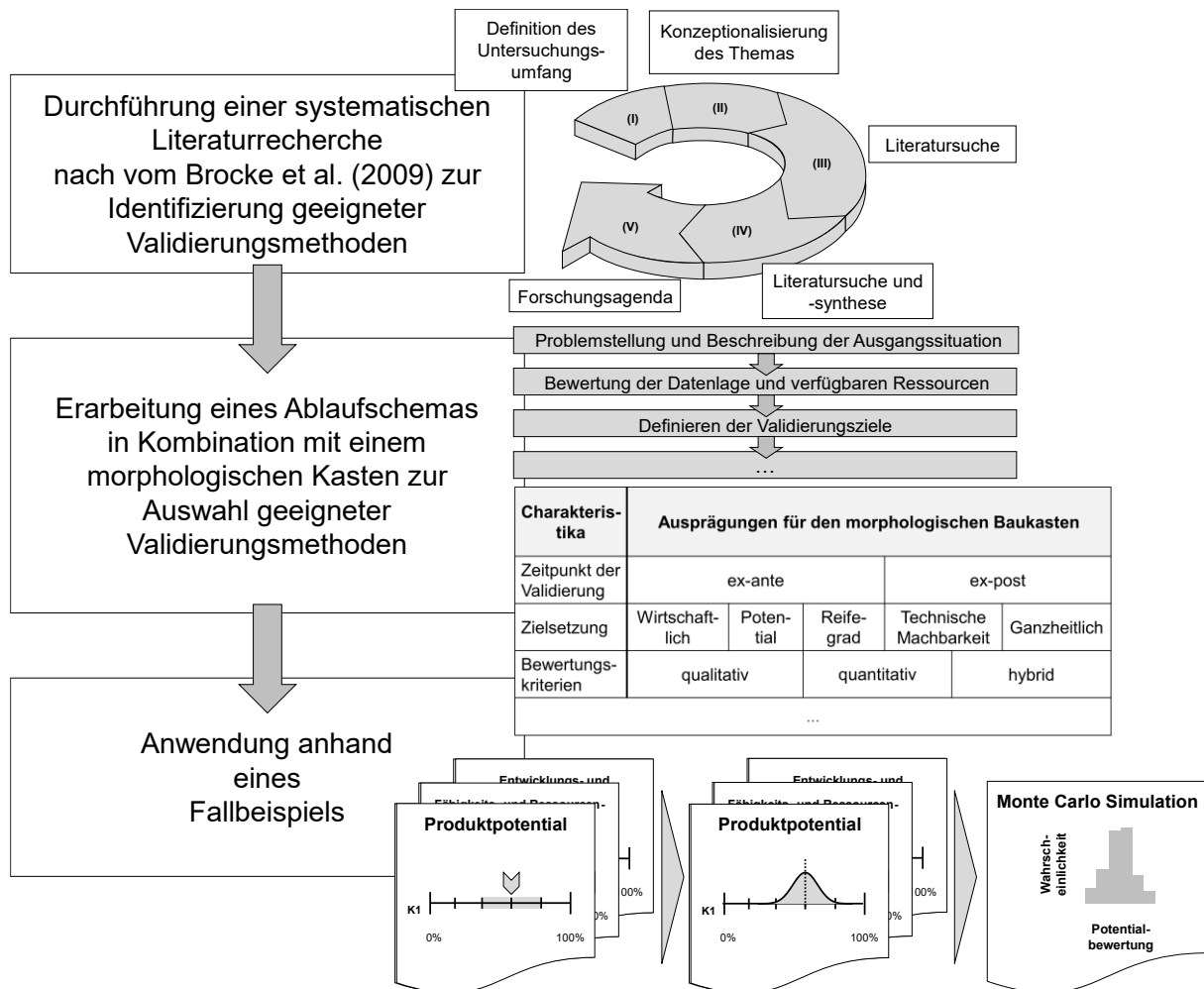


Abbildung 23: Darstellung des methodischen Vorgehens in der Arbeit

Das methodische Vorgehen gliedert sich in drei Hauptschritte (vgl. Abb. 23). Neben einer systematischen Literaturrecherche wird ein Ablaufschema in Kombination mit einem morphologischen Kasten erarbeitet. Nach der Konzeptionierung wird anhand eines Fallbeispiels aus der Literatur das Konzept beispielhaft angewendet und validiert. Um einen umfassenden Überblick über die aktuellen Forschungsergebnisse und Methoden der Validierung zu erhalten, wird im folgenden Abschnitt die Technik zur systematischen Literaturrecherche von vom Brocke et al. (2009) angewendet.

4.1 Durchführung der systematischen Literaturrecherche

Die Literaturrecherche in dieser Arbeit wurde basierend auf der dargestellten Vorgehensweise strukturiert. In diesem Abschnitt wird die Literaturrecherche im Detail erläutert. Zunächst erfolgt, wie von vom Brocke et al. (2009) beschrieben, die Definition der Forschungsfrage und des Forschungsziels (vgl. Abb. 22). Im zweiten Schritt wird die Literaturrecherche organisiert, wobei Datenbanken, Suchbegriffe und Ein- und Ausschlusskriterien festgelegt werden. Anschließend wird die Literatursuche in den Datenbanken durchgeführt und dokumentiert. Der

vierte Schritt beinhaltet eine Qualitätsbewertung der gesammelten Literatur in mehreren Phasen. Im fünften Schritt erfolgt eine Rückwärts- sowie Vorwärtssuche anhand der Literatur, die die Qualitätskontrolle bestanden hat und für die weitere Analyse in Betracht gezogen wird. Im letzten Schritt wird die final ausgewählte Literatur einer eingehenden Analyse, Auswertung und Darstellung unterzogen.

Definition des Forschungsziels

Das Ziel der systematischen Literaturrecherche ist es, eine Übersicht über geeignete Methoden der Validierung für Technologiebewertungsverfahren zu erstellen. Dafür wurden verschiedene Schwerpunkte der Literaturrecherche festgelegt. Die Schwerpunkte beinhalten Validierung im Kontext von Technologiebewertung sowie die Anwendung von Validierungsmethoden bei Technologiebewertungsverfahren.

Organisation der Literatursuche

Basierend auf der Forschungsfrage und den Schwerpunkten wurde zunächst eine initiale Recherche auf Google Scholar durchgeführt, um einen groben Überblick ergänzend zu der theoretischen Ausarbeitung über das Thema zu erhalten. Nachdem dieser Überblick erfolgt war, erfolgte die Vorbereitung für die Literatursuche. Hierzu wurde zunächst eine Auswahl von zehn Datenbanken getroffen, die potentiell für die Recherche genutzt werden sollen. Die ausgewählten Datenbanken umfassen: *Google Scholar*, *Engineering Village*, *Scopus*, *SpringerLink*, *Proquest*, *IEEEExplore*, *ScienceDirect*, *EBSCOhost*, die *Universitätsbibliothek der TU Dortmund* sowie *Web of Science*. In diesen Datenbanken soll die Suche nach relevanter Literatur im Zusammenhang mit der Forschungsfrage durchgeführt werden.

Nach einer ersten Recherche auf den verschiedenen Datenbanken wurde die Literaturrecherche auf die Datenbanken Web of Science und Google Scholar beschränkt, um die hohe Anzahl an doppelter Literatur zu vermeiden und den Rahmen der Literaturrecherche einzuschränken. Web of Science hat sich weitgehend als die Haupt-Akademiedatenbank etabliert, die für Forschungen von Fakultäten verwendet wird (Powell und Peterson 2017). Franceschini et al. (2016) beschreiben Web of Science und Google Scholar als multidisziplinäre Datenbanken, die häufig von einzelnen Wissenschaftlern und Forschungseinrichtungen zur Suche nach wissenschaftlichen Dokumenten verwendet werden (Franceschini et al. 2016). Durch die Hinzunahme von Google Scholar wird die Sicherheit und Vollständigkeit der Literaturrecherche gewährleistet.

Des Weiteren wurden Suchbegriffe für die Suche nach relevanter Literatur definiert. Hierbei wurden sowohl deutsche als auch englische Suchbegriffe in Betracht gezogen. Die Suchbegriffe wurden wiederum auf verschiedene Ebenen aufgeteilt. Ebene 1 konzentriert sich auf die gewünschte Form der Darstellung und umfasst Schlüsselbegriffe wie Methode oder Verfahren. Auf Ebene 2 wird der Themenbereich skizziert, der beispielsweise Suchbegriffe wie Validierung und Technologiebewertung einschließt. Die Suchbegriffe, die sich auf den Sektor Validierung beziehen, sind auf Ebene 3 aufgeführt. Schließlich enthält Ebene 4 Schlüsselbegriffe zur Technologiebewertung. Die Auflistung der deutschen und englischen Suchbegriffe ist in Tabelle 2 und Tabelle 3 dargestellt.

Tabelle 2: Suchbegriffe (deutsch) für die Literaturrecherche

Ebene 1	Ebene 2	Ebene 3	Ebene 4
Methode	Validierung	Validierung	Bewertung von Produktionstechnologien
Technik	V&V	Validierungsstudie	Technologieevaluierungsmodell
Modell	Technologiebewertung	Genauigkeit	Technologiebewertungsmodell
Verfahren	Technologieevaluation	Gültigkeit	Technologiebewertungsverfahren
Konzept		Glaubwürdigkeit	Wirtschaftlichkeitsbewertung
Vorgehen		Korrektheit	Reifegradbewertung
Methodik		Angemessenheit	Potentialbewertung
Vorgehensmodell			Technische Machbarkeit
Referenzmodell			
Verfahrensmodell			

Tabelle 3: Suchbegriffe (englisch) für die Literaturrecherche

Ebene 1	Ebene 2	Ebene 3	Ebene 4
Method	Validation	Validation	Evaluation of production technologies
Technique	V&V	Validation study	Technology evaluation model
Model	Technology assessment	Accuracy	Technology evaluation method
Procedure	Technology evaluation	Validity	Technology assessment model
Concept		Credibility	Economic efficiency evaluation
Approach		Correctness	Maturity level evaluation
Methodology		Appropriateness	Potential evaluation
Approach model			Technical feasibility
Reference model			
Procedure model			

Zur weiteren Präzisierung wurde in einem ersten Versuch der Zeitraum für die Literatursuche auf die Jahre 2018 bis 2024 begrenzt. Dies ermöglicht die Identifikation von Validierungsmethoden, die den aktuellen Stand der Technik widerspiegeln. Nach einer ersten Suche wurde ersichtlich, dass relevante Literatur vor dem Jahr 2018 existiert. Daher wird der Fokus zwar auf neue Literatur gelegt und darüber hinaus ältere Literatur mit eingebunden, um geeignete Validierungsmethoden zu identifizieren. Zudem wird ausschließlich auf Literaturquellen zugegriffen, die in den Datenbanken offen zugänglich sind, um eine direkte Verfügbarkeit für die Suche sicherzustellen. Darüber hinaus wurden die Suchergebnisse nach Ihrer Relevanz sortiert, um eine effiziente Auswahl der für die Forschung relevanten Informationen zu gewährleisten.

Nach einer ersten Recherche in der Datenbank Web of Science stellte sich heraus, dass sehr wenig relevante Literatur unter Verwendung deutscher Suchbegriffe gefunden wurde. Diese Suche wurde zudem in Google Scholar überprüft, wobei ebenfalls keine relevante Literatur gefunden wurde. Daher beschränken sich die in dieser Arbeit verwendeten Suchbegriffe vorwiegend auf den englischsprachigen Raum. In der initialen Recherche wurden die englischen Suchbegriffe zunächst auf Web of Science angewendet. Hierbei wurden sämtliche Begriffe innerhalb einer Ebene mittels des Suchoperators OR verknüpft, während die vier Ebenen durch den Suchoperator AND miteinander verbunden wurden (vgl. Tab. 4).

Tabelle 4: Vollständige Start-Suchkette mit englischen Suchbegriffen für Web of Science

Operator	Suchkette
AND	(method OR technique OR model OR procedure OR concept OR approach OR methodology OR "approach model" OR "reference model" OR "procedure model")
AND	(validation OR "verification & validation (V&V)" OR "technology assessment" OR "technology evaluation")
AND	(validation OR "validation study" OR accuracy OR validity OR credibility OR correctness OR appropriateness)
AND	("production technology evaluation" OR "technology evaluation procedure" OR "technology evaluation model" OR „technology assessment model" OR „technology assessment method" OR "criteria evaluation" OR "economic efficiency evaluation" OR "maturity level evaluation" OR "potential evaluation" OR "technical feasibility")

Im Anschluss wurden experimentell einzelne Suchbegriffe aus dieser Kette entfernt, um ihren Einfluss auf die Gesamtanzahl der Suchergebnisse zu analysieren. Anhand dieser Analyse konnten einige Begriffe ausgeschlossen werden, die für die Literatursuche nicht relevant sind. Die finale Liste der Suchbegriffe bildet die Grundlage für die nachfolgende Literaturrecherche (vgl. Tab. 5). Nach der Festlegung sämtlicher Kriterien für die Literatursuche wurde diese in den ausgewählten Datenbanken durchgeführt. Die Durchführung der Suche erfolgte unter Einsatz der finalen englischen Suchbegriffe, welche in Tabelle 5 dargestellt sind.

Tabelle 5: Finale Suchbegriffe für die Literaturrecherche

Ebene 1	Ebene 2	Ebene 3	Ebene 4
Method	Validation	Validity	Technology evaluation model
Technique	V&V	Validation study	Technology evaluation method
Model	Technology assessment		Technology assessment model
Procedure	Technology evaluation		Technology assessment method

Um die Ergebnisse weiter zu reduzieren und präzisere Suchergebnisse zu erhalten, wurde die Suche bei der Datenbank Web of Science auf festgelegte Suchfelder begrenzt. Bei der Datenbank Google Scholar konnten keine Suchfelder beschränkt werden. Aus diesem Grund wurden die Suchbegriffe bei dieser Datenbank in allen Feldern gesucht (vgl. Tab. 6).

Tabelle 6: Suchfelder in den Datenbanken

Datenbank	Suchfelder	Beschreibung
Web of Science	Topic (TS)	Titel, Zusammenfassung, Keyword
Google Scholar	Keine Beschränkung	-

Für die Datenbank Web of Science wurde erneut eine Suchkette basierend auf den final ausgewählten Suchbegriffen aus Tabelle 5 gebildet. Die Suchkette mit den Operatoren ist in Tabelle 7 dargestellt.

Tabelle 7: Finale Suchkette für Web of Science

Operator	Suchkette
AND	(method OR technique OR model OR procedure)
AND	(validation OR "verification & validation (V&V)" OR "technology assessment" OR "technology evaluation")
AND	(validity OR "validation study")
AND	("technology evaluation procedure" OR "technology evaluation model" OR „technology assessment model“ OR „technology assessment method“)

In der Datenbank Google Scholar wurden mehrere Suchen durchgeführt, um den Deckungsbereich der Suchbegriffe abzudecken. Bei Google Scholar wurden keine Suchoperatoren wie bei der Suche mit Web of Science verwendet, sondern spezifische Phrasen gesucht (vgl. Tab. 8).

Tabelle 8: Beispielhafte Suchketten für die Datenbank Google Scholar

Datenbank	Beispielhafte Suchketten
Google Scholar	Validation of technology evaluation models/methods
	Validity of technology evaluation models/methods
	Validation methods for technology evaluation models/methods
	Validation techniques for technology evaluation models/methods
	Validation of technology assessment models/methods
	Validity of technology assessment models/methods
	Validation methods for technology assessment models/methods
	Validation techniques for technology assessment models/methods
	...

Dies reduziert die Wahrscheinlichkeit irrelevante Ergebnisse zu erhalten, da die Suche aufgrund der genauen Formulierung präziser wird. Das Ziel war die Identifizierung von spezifischen Papern und Studien, die sich mit Validierungsmethoden im Kontext von Technologiebewertungsverfahren auseinandersetzen. Durch die Suche nach längeren Titeln oder spezifischen Phrasen kann zudem das Rauschen reduziert werden, d. h. es werden nur relevante Ergebnisse angezeigt. Die Verwendung von Operatoren kann dazu führen, dass Google Scholar eine größere Anzahl von Ergebnissen liefert, die möglicherweise nicht relevant sind.

Bei jeder Suche auf den beiden Datenbanken wurden die ersten 10 Seiten für die weitere Untersuchung in Betracht gezogen. Dadurch ergaben sich 750 Literaturen bei Web of Science und 100 Literaturen, je Suchkette, bei Google Scholar (insgesamt 900 Literaturen), die untersucht und für die für die erste Bewertungsphase der Qualität in Betracht gezogen wurden.

Qualitätsbewertung der Literatur

Von den Suchergebnissen wurden per Suche die relevanten Literaturen anhand des Titels und der Keywords herausgefiltert. Zusammenfassend ergaben sich nach der ersten Bewertungsphase 75 Literaturen, die für die zweite Bewertungsphase in Betracht kommen. Eine Liste mit den jeweiligen Literaturen der Datenbanken und dazugehöriger Suchkette ist in Anhang A (Web of Science) und Anhang B (Google Scholar) beigefügt. Die Ergebnisse wurden hierbei in Tabellen mit den Autoren, dem Titel und der Art der Literatur dargestellt.

Literaturen, die in einer Datenbank (Web of Science und Google Scholar) bei mehreren Suchanfragen vorgekommen sind wurden aussortiert. Von den 75 untersuchten Literaturen wiesen zwei Redundanzen auf. Folglich wurden für die zweite Bewertungsphase nur 73 Literaturquellen betrachtet. In der zweiten Bewertungsphase wurden auf Basis der Zusammenfassung weitere, für das Thema der Arbeit nicht relevante Literaturen, aussortiert, sodass 38 Literaturen für die dritte Bewertungsphase in Betracht gezogen wurden. Diese wurden anschließend vollständig gelesen und nach ihrer inhaltlichen Relevanz für die Arbeit bewertet. Letztendlich sind 27 Literaturen für die Arbeit relevant, wobei sich der Zeitraum der Literaturen von 1983-2023 erstreckt. Eine Auflistung der Literaturen ist in Anhang A und Anhang B zu finden.

Rückwärts- und Vorwärtssuche

Anhand der 27 relevanten Literaturen wurde anschließend eine Rückwärts- und Vorwärtssuche durchgeführt. In diesem Kontext wurden für die Literatur die gleichen Kriterien angewendet wie bei der ursprünglichen Literatursuche. Durch die Rückwärts- und Vorwärtssuche wurden keine weiteren relevanten Literaturen gefunden. Der nächste Abschnitt beinhaltet die Gegenüberstellung und Einordnung der Literaturlauswertung. Dabei werden die Ergebnisse aus den 27 für die Arbeit relevanten Literaturen analysiert und angewandte Validierungsmethoden herausgestellt.

4.2 Gegenüberstellung und Einordnung der Literaturlauswertung

Im letzten Schritt der systematischen Literaturrecherche wurden die finalen 27 Literaturen ausgewertet. Dazu wurden die Literaturen vollständig gelesen, um für diese Arbeit geeignete Validierungsmethoden herauszufiltern. Abbildung 24 stellt den Prozess der Literaturbewertung zusammenfassend dar.

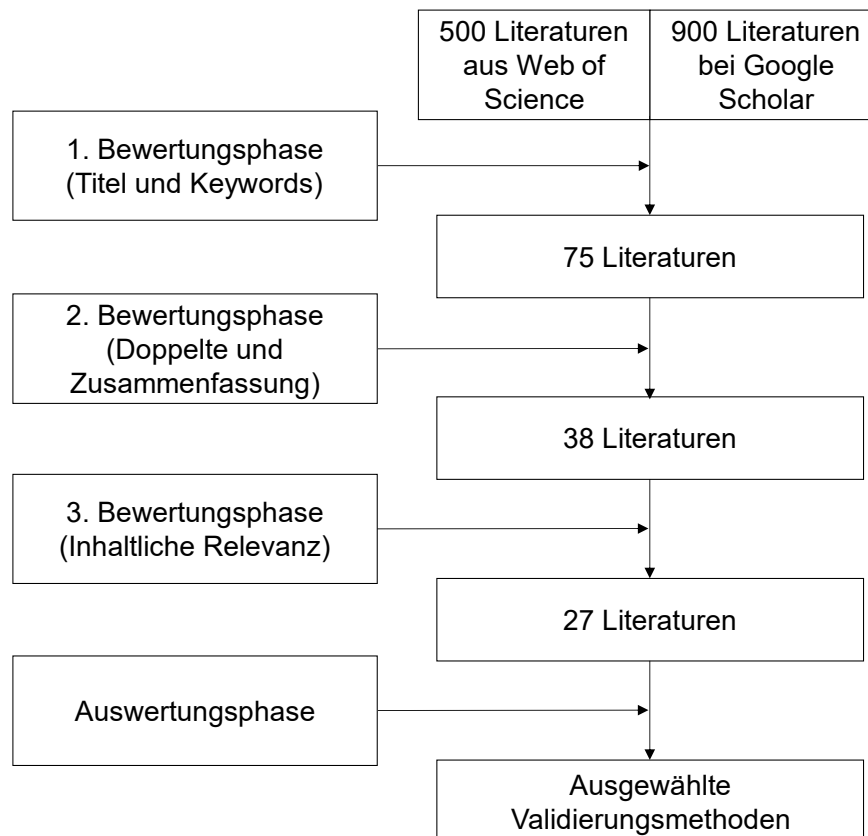


Abbildung 24: Prozess zur systematischen Bewertung der Literatur

Aus 1400 Literaturen wurden 27 relevante Literaturen entnommen. Im letzten Schritt, der Auswertungsphase, werden die Validierungsmethoden in der finalen Literatur betrachtet und ausgewertet. In diesem Zusammenhang wurde untersucht, welche Validierungsmethoden in der jeweiligen Literatur erwähnt und beschrieben werden. Diese wurden herausgefiltert und den Quellen zugeordnet. Die Ergebnisse der Auswertungsphase sind in Anhang A für Web of Science und in Anhang B für Google Scholar dargestellt.

Hierbei ist anzumerken, dass nicht in jeder Literatur die Validierungsmethode im Kontext von Technologiebewertungsverfahren erwähnt wurde. Dies ist aufgrund der geringen Forschungsintensität in diesem Themengebiet unvermeidbar. Dementsprechend sind darüber hinaus beispielsweise Literaturen enthalten, die sich mit Methoden der Validierung für Modelle und Bewertungsverfahren beschäftigen und keinen vollständigen Fokus auf Technologiebewertungsverfahren besitzen. Da sie in ihrer Anwendung allgemeingültig sind und teilweise keine komplexen Anforderungen benötigen, werden diese mit aufgenommen. In Anhang A und Anhang B sind die Methoden der Validierung in den jeweiligen Literaturen veranschaulicht. Anhand dieser werden im Folgenden die Ergebnisse eingeordnet.

In der ausgewählten Literatur wird Face Validation (zu Deutsch: Augenscheinvalidität) als die am häufigsten angewandte Methode identifiziert. Expert Opinion (zu Deutsch: Expertenmeinung) wird neben der Face Validation mit am häufigsten erwähnt. Gemeinsam mit Internal Validation, External Validation und Cross-model Validation (zu Deutsch: Interne Validierung, Externe Validierung und Validierung durch Kreuzmodell-Ansätze) bilden diese Methoden die wesentlichen Methoden zur Überprüfung der Validierung von Technologiebewertungsverfahren. Eine weitere häufig angewandte Methode besteht in der Data-Driven Validation (zu Deutsch: Datengetriebene Validierung). Hierbei ist insbesondere der Ansatz von Noh et al. (2017) zu erwähnen, der sich spezifisch mit der Verbesserung von Technologiebewertungsverfahren beschäftigt. Der vorgestellte Ansatz beschäftigt sich mit der Verbesserung eines Technologiebewertungsverfahrens durch die Anwendung von Statistical Techniques (zu Deutsch: Statistische Techniken), welche Methoden der datengetriebenen Validierung darstellen. Statistische Techniken werden u. a. bei Yuan et al. (2015), Donos-Bravo (2005) und Mayer (1993) ebenfalls betrachtet.

In den Papern von McCabe (2000) und Ten Broeke et al. (2020) wird die Structural Validation (zu Deutsch: Strukturelle Validierung) erwähnt, während bei Ivarsson et al. (2010) ein ähnlicher Ansatz mit der Construct Validation (zu Deutsch: Konstruktvalidierung) erwähnt wird. Kröll (2007) validiert sein Verfahren der Technologiebewertung anhand einer beispielhaften Anwendung der Methode in der Praxis. Dieser Ansatz basiert auf der Methode Experimental Validation (zu Deutsch: Experimentelle Validierung), welche ebenso bei Cowles (2014) und Landry (1983) erwähnt wird. Weitere Methoden, die vereinzelt in Literaturen erwähnt werden, sind Sensitivity Analysis, Predictive Validation, Informal Validation (zu Deutsch: Sensitivitätsanalyse, Validierung durch Vorhersagen und Informelle Validierung). Besonders erwähnenswert sind zudem Audit, Documentation Checking, (Peer) Review und Inference (zu Deutsch: Audit, Dokumentenüberprüfung, Überprüfung (durch Fachkollegen) und Interferenz), die im Paper von Altinok et al. (2021) erwähnt werden. Hierbei ist zu erwähnen, dass sich das Paper auf Simulationen bezieht, die Methoden aufgrund ihrer informellen Eigenschaft jedoch für eine Validierung von Technologiebewertungsverfahren geeignet sind. Darüber hinaus ist User Assessment (zu Deutsch: Bewertung durch Anwender) eine weitere informelle Methode, die bei Borenstein (1998) genannt wird und für die Arbeit berücksichtigt wird.

Aufgrund der hohen Anzahl an Validierungsmethoden werden die verschiedenen Methoden zu Gruppen zusammengefasst. In Abbildung 25 sind die Beschreibungen der aufgelisteten

Gruppen der Validierungsmethoden inklusive der Autoren, die die Methoden in ihrer Literatur erwähnt haben, dargestellt. Die Validierungsgruppen wurden anhand der Eigenschaften der Validierungsmethoden gebildet. Im Folgenden werden die jeweiligen Validierungsgruppen sowie Methoden innerhalb der Gruppen erläutert, wobei die Quellen aus den Ergebnissen der Literaturlauswertung in Anhang A und Anhang B als Referenzen genutzt werden.

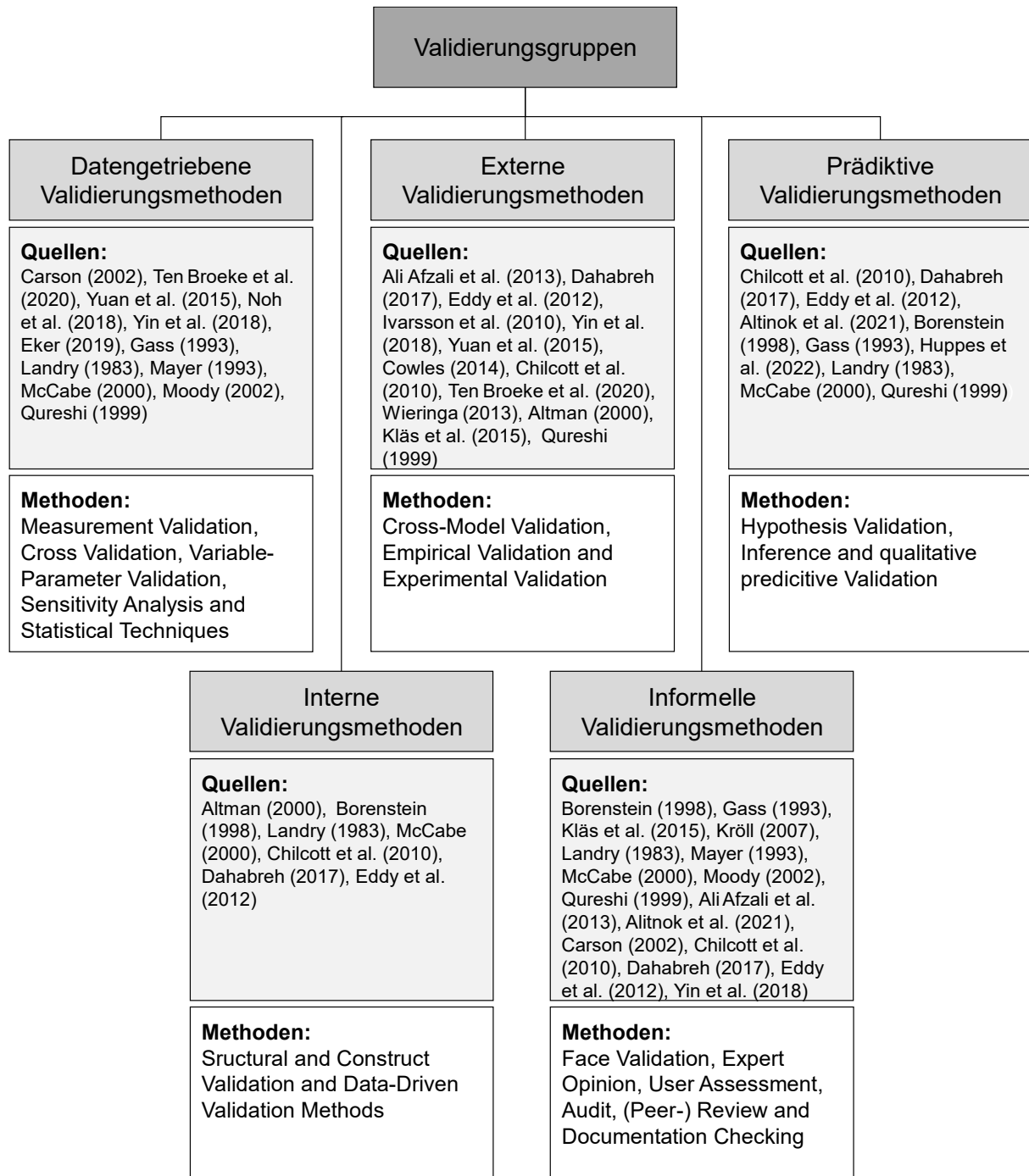


Abbildung 25: Gruppen von Validierungsmethoden

Die erste Validierungsgruppe bilden die datengetriebenen Validierungsmethoden. Datengetriebene Validierungsmethoden sind darauf ausgerichtet, die Genauigkeit der Ergebnisse eines Technologiebewertungsverfahrens zu überprüfen, indem sie historische Daten

analysieren und Muster identifizieren (Noh et al. 2017). Vor diesem Hintergrund sind datengetriebene Validierungsmethoden für die Validierung von Technologiebewertungsverfahren mit ausschließlich quantitativen Bewertungskriterien besonders geeignet (McCabe und Dixon 2000; Qureshi et al. 1999; Klas et al. 2015; Noh et al. 2017). Dennoch können sie zur Ergänzung qualitativer Analysen und anderer Validierungsmethoden verwendet werden, indem sie Kontext oder Hintergrundinformationen bereitstellen (Gass 1983). Dadurch können ex-ante beispielsweise Vorhersagen validiert werden, auf denen das Technologiebewertungsverfahren aufgebaut ist (Qureshi et al. 1999). Zudem können durch datengetriebene Validierungsmethoden ex-post Fehler oder Schwächen im Verfahren oder in den Daten identifiziert werden, um die optimalen Parameter zu bestimmen (Yin und McKay 2018).

Aufgrund der Abhängigkeit von der Datenverfügbarkeit sind derartige Methoden bei unzureichender oder qualitativ minderwertiger Datenbasis nur limitiert anwendbar (Noh et al. 2017; Eker et al. 2019; Mayer und Butler 1993; Qureshi et al. 1999). Dadurch kann die Zuverlässigkeit und Repräsentativität der erzielten Ergebnisse für die Realität beeinträchtigt werden (Noh et al. 2017). Im Gegensatz dazu bietet eine umfassende Datenbasis die Möglichkeit der Anwendung von datengetriebenen Validierungsmethoden, wobei die Anwendung mit einem hohen Zeitaufwand verbunden ist (Carson 2002). Dies basiert auf der Tatsache, dass umfangreiche Daten wie beispielsweise Evaluierungsergebnisse für die Validierung eines Technologiebewertungsverfahrens betrachtet werden müssen (Landry et al. 1983). Die zeitaufwendigen Schritte umfassen hierbei die Datensammlung, -analyse und -interpretation (Noh et al. 2017). Zudem hängt die Dauer von der Verfügbarkeit qualitativer Daten ab, wodurch möglicherweise eine aufwendige Datenaufbereitung notwendig ist (Moody und Shanks 2003). Für die Daten wird oft spezialisierte Software oder Tools zur Datenaufbereitung und -analyse eingesetzt, die sich auf die Kosten der Anwendung auswirkt und möglicherweise erworben oder lizenziert werden muss (Noh et al. 2017). Die Heterogenität der Daten aus verschiedenen Quellen kann zusätzliche Herausforderungen mit sich bringen, da möglicherweise Inkonsistenzen oder Unstimmigkeiten zwischen den Datenquellen auftreten (Qureshi et al. 1999). Im Folgenden werden die einzelnen Methoden aus der Validierungsgruppe kurz erläutert.

Messvalidierung beschreibt eine Methode, die darauf abzielt sicherzustellen, dass die in einem Verfahren verwendeten Messinstrumente oder Metriken tatsächlich das messen, was sie zu messen beabsichtigen (Yuan und Xu 2015). Bei der Variable-Parameter Validierung werden gezielt die Parameter des Verfahrens systematisch variiert, um zu prüfen, wie empfindlich die Verfahrensergebnisse auf Veränderungen der Parameter reagieren (Gass 1983). Gleichmaßen wie bei der Variable-Parameter Validierung beinhaltet die Sensitivitätsanalyse die Untersuchung, wie sich kleine Änderungen in den Parametern auf die Verfahrensergebnisse auswirken (Yin und McKay 2018). Dadurch kann festgestellt werden, welche Parameter einen signifikanten Einfluss auf die Ergebnisse haben und welche weniger kritisch sind (Yin und McKay 2018). Statistische Techniken werden zudem bei der datengetriebenen Validierung angewendet, um Verbesserungen an Verfahren zu erzielen (Mayer und Butler 1993). Derartige Techniken bieten klare Kriterien, objektive Informationen und helfen, Unterschiede bei den erwarteten Verfahrensergebnissen mit den tatsächlich erzielten Ergebnissen durch die Anwendung von Statistik zu analysieren (Noh et al. 2017). Datengetriebene Validierungs-

Methoden wie Messvalidierung und statistische Techniken eignen sich aufgrund ihrer Eigenschaften für komplexe Verfahren, die auf umfangreichen Datensätzen basieren (Noh et al. 2017; Yuan und Xu 2015). Sie ermöglichen eine detaillierte Analyse der Daten und helfen, komplexe Muster und Zusammenhänge zu identifizieren, die zur Bewertung der Leistung des Verfahrens verwendet werden (Noh et al. 2017). Darüber hinaus ermöglichen diese Methoden eine objektive Messung der Evaluierungsergebnisse des Technologiebewertungsverfahrens, da sie auf empirischen Daten basieren (Landry et al. 1983).

Eine weitere Validierungsgruppe bezeichnet die internen Validierungsmethoden, die anhand interner Daten eine Validierung vornehmen (Wieringa 2014). Hier finden zudem die Methoden der datengetriebenen Validierung Anwendung, um die Variablen und Messung innerhalb des Verfahrens zu überprüfen. Der wesentliche Unterschied zwischen den Methoden besteht in der Art der Daten, die für die Validierung und in der Herangehensweise an den Validierungsprozess verwendet werden (McCabe und Dixon 2000). Interne Validierungsmethoden basieren auf internen Daten, die beispielsweise durch Experimente oder internen Studien gesammelt und analysiert werden (Altman und Royston 2000). Im Kontrast dazu basieren datengetriebene Validierungsmethoden überwiegend auf externen Datenquellen wie beispielsweise historischen Daten oder empirischen Studien. Bezogen auf interne Validierungsmethoden spielt die Datenlage somit eine entscheidende Rolle, da sie die Grundlage für die Durchführung von internen Tests sowie der Beurteilung der Validität der Ergebnisse bildet (Chilcott et al. 2010). Bei der internen Validierung wird beispielsweise die Auswirkung einer unabhängigen Variable auf eine abhängige Variable anhand interner Daten untersucht (Yin und McKay 2018). Die Validierungsmethoden werden in einem zeitaufwendigen Prozess an die internen Szenarien und Bedingungen angepasst (Chilcott et al. 2010). Szenarien und Bedingungen können die Anpassung der Bewertungskriterien an die komplexen internen Prozesse in einer Produktion darstellen, um relevante und aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten.

Ein wesentlicher Vorteil der Methoden besteht darin, dass der Validierungsprozess vollständig kontrolliert und an die spezifischen Anforderungen angepasst werden kann (Altman und Royston 2000). Dadurch wird es ermöglicht, schnell Feedback zu erhalten und Änderungen vorzunehmen, um den Validierungsprozess zu verbessern (Ivarsson und Gorschek 2011). Die Methoden ermöglichen eine gründliche Prüfung der relevanten Aspekte im Technologiebewertungsverfahren. Allerdings sind diese zeitintensiv, insbesondere wenn das Bewertungsverfahren komplex ist oder umfangreiche Anpassungen erfordert (Altman und Royston 2000). Bei den Methoden der internen Validierung ist zusätzlich zu den datengetriebenen Methoden die strukturelle Validierung und Konstrukt Validierung hervorzuheben.

Strukturelle Validierung beschreibt die Überprüfung der Struktur oder des Aufbaus eines Modells, einer Theorie oder eines Systems, um sicherzustellen, dass es logisch kohärent, konsistent und relevant ist (Gass 1983). Hierbei werden Aspekte wie die Validierung von Annahmen, Konsistenz mit Theorien oder die logische Konsistenz eines Technologiebewertungsverfahrens betrachtet (Gass 1983). Konstrukt Validierung ist vergleichbar und bezieht sich auf den Prozess der Überprüfung, ob ein Messinstrument oder Modell tatsächlich das theoretische Konzept oder Konstrukt misst, das es zu messen vorgibt (Ivarsson und Gorschek 2011). Im

Kontext der Bewertung von Technologiebewertungsverfahren bedeutet dies sicherzustellen, dass die in einem Verfahren verwendeten Variablen und Messungen tatsächlich die beabsichtigten Konstrukte repräsentieren. Die Methoden eignen sich für ex-ante Bemühungen, um vor der Anwendung sicherzustellen, dass das Bewertungsverfahren eine geeignete Struktur aufweist und einen kohärenten Rahmen für die Bewertung der Technologie bietet (McCabe und Dixon 2000). Hierbei unterstützen sie potentielle Schwachstellen im Design des Bewertungsverfahrens zu identifizieren und zu beheben, bevor es implementiert wird (Ivarsson und Gorschek 2011). Die Validierungsmethoden eignen sich aufgrund ihrer Orientierung an Daten nur für quantitative Bewertungskriterien, können darüber hinaus dennoch für qualitative Bewertungskriterien nützlich sein (Gass 1983). Strukturelle Validierung und Konstrukt Validierung erfordern die klare Definition von Konstrukten oder Merkmalen, die gemessen werden sollen (Altman und Royston 2000). Dies bedeutet, dass die Elemente, aus denen das Messinstrument besteht (wie Fragen in einem Fragebogen oder Variablen in einem Experiment), repräsentativ für die zu messenden Konstrukte sein müssen. Selbst wenn die Bewertungskriterien qualitativ sind, können sie in klar definierte Konstrukte umgewandelt werden, die anschließend validiert werden können (Ivarsson und Gorschek 2011). Sie können somit dazu beitragen eine höhere Sicherheit bezüglich der Zuverlässigkeit der Annahmen und Strukturen der relevanten Aspekte eines Technologiebewertungsverfahrens zu gewährleisten (McCabe und Dixon 2000).

Die dritte Validierungsgruppe bilden die Methoden der externen Validierung. Bei externen Validierungsmethoden werden externe, unabhängige Datenquellen oder Expertenmeinungen genutzt, um die Gültigkeit oder Leistung eines Verfahrens, Modells oder Systems zu überprüfen (Chilcott et al. 2010). Diese externen Daten können beispielsweise aus Literaturstudien, Vergleichsstudien mit ähnlichen Verfahren oder Expertenbewertungen stammen (Eddy et al. 2012). Die Anwendung der Methoden ist somit von der Verfügbarkeit von externen Daten abhängig, um die Übertragbarkeit der eigenen Ergebnisse zu evaluieren (Ivarsson und Gorschek 2011). Eine umfassende externe Datenlage bietet die Möglichkeit eine bessere Analyse und Interpretation der Faktoren außerhalb des unmittelbaren Forschungsrahmens zu verstehen und zu berücksichtigen, die potentiell die Anwendbarkeit der erzielten Resultate beeinflussen können (Ivarsson und Gorschek 2011). Analog zu den datengetriebenen Methoden sind in diesem Zusammenhang hier die Datensammlung, -aufbereitung, -analyse und -integration zeitaufwendige Prozesse (Yin und McKay 2018). Die Analyse der erhobenen Daten erfordert beispielsweise einen zeitlichen Aufwand für die Durchführung statistischer Tests, den Vergleich zwischen unterschiedlichen Modellen oder experimentellen Bedingungen (Chilcott et al. 2010). In diesem Zusammenhang ist die Analyse und Interpretation zeitaufwendig, insbesondere wenn komplexe Datenanalysen erforderlich sind (Klas et al. 2015). Oftmals wird für den Zugang zu externen Daten mit externen Partnern kooperiert, die relevante Daten zur Verfügung stellen (Wieringa 2014). Obwohl die Methoden auf quantitativen Daten basieren, können gleichermaßen qualitative Bewertungskriterien durch einen Vergleich mit externen Standards, Verfahren oder Expertenmeinungen validiert werden (Altman und Royston 2000). Darüber hinaus können die Methoden nützlich sein, um die Robustheit eines Verfahrens gegenüber externen Einflüssen und Unsicherheiten wie z. B. sich ändernde Umweltauflagen oder neue

technologische Innovationen zu testen (Altman und Royston 2000). Durch den Vergleich mit externen Datenquellen oder vergleichbaren Verfahren werden potentielle Unsicherheiten im Verfahren identifiziert und bewertet (Altman und Royston 2000). Ein wesentlicher Nachteil der externen Validierungsmethoden ist die begrenzte Verfügbarkeit von Daten, insbesondere bei komplexen Verfahren, die ähnliche Annahmen und Methoden verwenden (Yin und McKay 2018). Im Folgenden werden die Methoden der externen Validierung kurz erläutert.

Kreuzmodellvalidierung bezeichnet die Überprüfung der Ergebnisse eines Technologiebewertungsverfahrens mit unabhängigen Verfahren, die dieselbe technologische Fragestellung behandeln (Eddy et al. 2012). In der Praxis könnte dies ein Vergleich zwischen zwei Technologiebewertungsverfahren bedeuten, die sich beispielsweise auf die Potentialbewertung von Produktionstechnologien beziehen. Durch eine solche Vergleichsanalyse lassen sich potentielle Inkonsistenzen, Defizite sowie Potentiale in den methodischen Ansätzen identifizieren, wodurch eine Steigerung der Validität erzielt werden kann (Yin und McKay 2018). Empirische Validierung bezieht sich auf die Überprüfung der Validität von Technologiebewertungsverfahren durch den Vergleich mit realen empirischen Daten oder Beobachtungen (Dallasega et al. 2022). In Bezug auf die Überprüfung der Validität von Technologiebewertungsverfahren bedeutet dies, dass die Prognosen des Verfahrens beispielsweise in Bezug auf die Leistung einer Technologie mit den tatsächlichen Messungen oder Beobachtungen verglichen werden. Wenn die Prognosen des Verfahrens nahezu mit den empirischen Daten übereinstimmen, stärkt dies die Validität des Verfahrens. Insbesondere erweist sich die ex-post Analyse, bei der die Evaluierungsergebnisse des Verfahrens mit realen Daten und Beobachtungen abgeglichen werden, als von herausragendem wissenschaftlichem Interesse bei der Validierung (Dallasega et al. 2022). Experimentelle Validierung bezeichnet die Durchführung von gezielten Experimenten oder Tests, um die Vorhersagen und Ergebnisse des Verfahrens zu überprüfen (Landry et al. 1983). Hierzu zählt die praktische Anwendung des Verfahrens an einem Technologiebeispiel (Hall 2002). Die experimentelle Validierung umfasst zusätzlich die Planung, Durchführung und Auswertung von Experimenten (Kröll 2007). Kontrollierte Experimente ermöglichen es beispielsweise spezifische Annahmen und Hypothesen des Verfahrens zu überprüfen und zu validieren (Kröll 2007).

Methoden, die auf subjektiven und qualitativen Einschätzungen basieren, werden als informelle Validierungsmethoden gruppiert. Die Validierung eines Verfahrens erfolgt basierend auf der Einschätzung oder qualitativem Feedback von Experten oder Fachleuten (vgl. Unterabschnitt 3.1.2). Hierbei hat die Verfügbarkeit von Daten eine untergeordnete, unterstützende Funktion, indem eine fundierte Einschätzung gewährleistet wird (Yin und McKay 2018). Im Gegensatz zu Methoden der Validierung mit Daten sind Methoden der informellen Validierung weniger zeitaufwändig, da sie auf qualitativem Feedback von Experten oder Fachleuten basieren und somit weniger Aufwand benötigen (Gass 1983; Klas et al. 2015). Aufgrund ihrer qualitativen Eigenschaft sind Informelle Validierungsmethoden besonders geeignet, wenn die Bewertungskriterien qualitativ sind (Gass 1983; Qureshi et al. 1999; Borenstein 1998; Yin und McKay 2018). Dies ergibt sich aus der Erkenntnis, dass die Validierung eines Verfahrens nicht zwangsläufig den Einsatz quantitativer Daten erfordert. Darüber hinaus sind informelle Validierungsmethoden eher weniger für komplexe Verfahren geeignet, da die Methoden eine

mangelnde Tiefe aufweisen und somit keine ausreichend detaillierte Analyse der Validität erfolgt (Qureshi et al. 1999). Des Weiteren können die Meinungen der Experten bei komplexen Verfahren stark variieren, was zu Inkonsistenzen in der Validierung führt (Klas et al. 2015). Die informelle Natur dieser Methoden ermöglicht ihre Anwendung in verschiedenen Kontexten und Szenarien, gleichermaßen ob diese sinnvoll erscheinen (Gass 1983). So können diese beispielsweise als Ergänzung von anderen Validierungsmethoden geeignet sein, um die erzielten Ergebnisse, basierend auf Daten, zu unterstützen. Die Validierungsgruppe setzt sich aus fünf Methoden der Validierung zusammen.

Augenscheinvalidität bezeichnet die Validierung anhand des ersten Blicks durch einen Experten auf ein Verfahren (Gass 1983). Expertenmeinung bezieht sich auf Feedback von Experten, während Bewertung durch Anwender die Bewertung der Methode durch Endnutzer oder Anwender beschreibt (Kane 2001). Audit bezeichnet die Überprüfung der Methode mit mehreren Auditoren, um die festgelegten Standards, Richtlinien und Anforderungen zu überprüfen (Balci 1998). Die Methode ist aufgrund der Einbeziehung der Stakeholder eine wichtige Validierungsmethode, um das Verfahren basierend auf den unterschiedlichen Vorstellungen zu entwickeln und zu validieren (Dahabreh et al. 2017). Review stellt die Überprüfung der Methode durch Fachexperten oder unabhängigen Prüfern dar und wird oft mit Expertenmeinungen kombiniert (Balci 1998). In diesem Zusammenhang bezieht sich ein Review auf eine systematische Überprüfung, Bewertung oder Analyse eines festgelegten Themengebiets (Balci 1998). Peer bedeutet in diesem Kontext, dass die Experten aus einem spezifischen Fachgebiet kommen (Balci 1998). Die Dokumentenprüfung konzentriert sich auf die Überprüfung von schriftlichen Unterlagen und Dokumentationen, die beispielsweise die Verfahrensentwicklung der Technologiebewertung beschreiben (Balci 1998). Expertenmeinungen, Bewertung durch Anwender des Bewertungsverfahrens und die Überprüfung anhand der Dokumente sind geeignete Validierungsmethoden, da diese weitestgehend sichere Quellen der Überprüfung darstellen (Dahabreh et al. 2017).

Prädiktive Validierungsmethoden sind Ansätze zur Überprüfung der Vorhersagegenauigkeit eines Verfahrens oder einer Hypothese (Landry et al. 1983). Sie analysieren historische Daten, um Modelle zu erstellen, die daraufhin verwendet werden können, um Vorhersagen über zukünftige Ereignisse zu treffen (Landry et al. 1983). In diesem Kontext ist die Datenlage von großer Wichtigkeit, um zuverlässige Vorhersagen zu treffen und die Zuverlässigkeit der Validität des Verfahrens zu verbessern (Chilcott et al. 2010). Ein Beispiel hierfür wäre die Sammlung von Daten aus verschiedenen Quellen wie z. B. Laborstudien, Pilotprojekten oder Simulationen, um die Leistung einer Produktionstechnologie vorherzusagen. Durch die Analyse dieser Daten kann ein Unternehmen Modelle entwickeln, die Vorhersagen darüber treffen, wie sich die Produktionstechnologie in realen Produktionsumgebungen verhalten wird. Eine umfangreiche und hochwertige Datenlage ist entscheidend, um diese Modelle genau zu kalibrieren und zu validieren. Methoden der prädiktiven Validierung erfordern eine längere Zeitspanne, um die definierten Hypothesen und Vorhersagen in einem Technologiebewertungsverfahren mit tatsächlichen Ergebnissen, die erzielt wurden, zu vergleichen (Gass 1983). Der initiale Schritt dieses Prozesses besteht häufig in der Formulierung von Hypothesen, was einen zeitintensiven Vorgang darstellt, da er sorgfältige Recherche und Analyse erfordert, um

fundierte Hypothesen zu generieren (Gass 1983). Einen weiteren zeitaufwendigen Schritt bildet die Validierung selbst. Hierbei ist die Datenerhebung, -analyse und -interpretation sowie die Modellbildung hervorzuheben (Chilcott et al. 2010). Langfristige Vorhersagen können zudem zusätzlichen Zeitaufwand bedeuten, bis eine Validierung erzielt werden kann (Hupples und Schaubroeck 2022). Prädiktive Validierungsmethoden sind auf die ex-ante Validierung ausgerichtet (Gass 1983). Sie analysieren historische Daten, um Modelle zu erstellen, die verwendet werden können, um Vorhersagen über zukünftige Ereignisse zu treffen (Landry et al. 1983). Anhand der Prüfung der Vorhersagefähigkeit unter verschiedenen Szenarien kann darüber hinaus die Auswirkungen von Unsicherheiten auf die Ergebnisse bewertet werden (Landry et al. 1983). Im Folgenden werden die Methoden kurz erläutert.

Hypothesen Validierung bezieht sich auf den Prozess der Bestätigung oder Ablehnung von Hypothesen, die im Rahmen des Verfahrens aufgestellt werden (Gass 1983). Eine Hypothese ist eine vorläufige Annahme oder Erklärung, die darauf abzielt, spezifische Aspekte des Verfahrens oder seiner Ergebnisse zu erklären (Gass 1983). Interferenz beschreibt den Prozess des Ziehens von Schlussfolgerungen beispielsweise basierend auf den Verfahrensergebnissen, indem u. a. statistische Analysen angewendet werden (Balci 1998). Diese Schlussfolgerungen sollen dazu beitragen, definierte Aussagen oder Hypothesen über das Technologiebewertungsverfahren zu überprüfen oder neue Erkenntnisse zu gewinnen (Balci 1998). Qualitative prädiktive Validierung zielt darauf ab, die Validierung von Verfahren anhand der Abdeckung relevanter Mechanismen und der Vorhersage von Bedingungen und Szenarien zu bewerten (Hupples und Schaubroeck 2022). Die Methode von Hupples und Schaubroeck (2022) basiert auf einer qualitativen Checkliste und ist weniger auf die Nutzung von Daten ausgerichtet (Hupples und Schaubroeck 2022). Eine gezielte Umsetzung von Interviews, Beobachtungen oder anderen qualitativen Methoden zum Ausfüllen der Checkliste beansprucht Zeit (Hupples und Schaubroeck 2022). Darüber hinaus erfordert die Analyse dieser Daten eine detaillierte Interpretation und somit einen zusätzlichen Zeitaufwand (Hupples und Schaubroeck 2022).

Zusammenfassend wurde in diesem Kapitel das methodische Vorgehen für die vorliegende Arbeit beschrieben. Der erste Schritt umfasste eine systematische Literaturrecherche nach vom Brocke et al. (2009) mit dem Ziel, geeignete Validierungsmethoden für Technologiebewertungsverfahren zu identifizieren. Die Auswertungsphase der systematischen Literaturrecherche konzentrierte sich auf die Validierungsmethoden in der final ausgewählten Literatur. Bei Betrachtung der Literaturen sind Validierungsmethoden vielfältig. Eine Anwendung von Validierungsmethoden in Bezug auf die Validierung von Technologiebewertungsverfahren wird in diesem Zusammenhang eher selten betrachtet. Resultierend aus der geringen Forschungsintensität in diesem Themengebiet wurden Validierungsmethoden aus der Literatur mit einbezogen, die allgemein für die Validierung von Modellen und Bewertungsverfahren eingesetzt werden. Augenscheinvalidität und Expertenmeinungen sind die am häufigsten angewandten Methoden, wobei sie zusammen mit interner Validierung, externer Validierung und prädiktiver Validierung die wesentlichen Methoden zur Überprüfung der Validierung von Verfahren bilden (vgl. Anhang A und Anhang B). Datengetriebene Validierung ist zudem häufig vertreten. Hierbei ist der Ansatz von Noh et al. (2017) hervorzuheben, welcher statistische

Techniken zur Verbesserung eines Technologiebewertungsverfahrens anwendet. Um die Vielzahl der Validierungsmethoden zu strukturieren, wurden diese in Gruppen zusammengefasst (vgl. Abb. 25). Es wurden fünf Gruppen von Validierungsmethoden gebildet. Die wichtigsten Eigenschaften und Vor- und Nachteile der Gruppen sowie einzelnen Validierungsmethoden wurden anschließend näher beschrieben und erläutert, um anhand dieser Informationen das Konzept zu entwickeln und zu strukturieren. Diese bilden die Zielgruppen der zu konzipierenden Entscheidungsunterstützung für die Auswahl geeigneter Validierungsmethoden. In diesem Zusammenhang werden, wenn möglich, einzelne Methoden aus den Validierungsgruppen hervorgehoben, sofern diese besonders für einen spezifischen Kontext geeignet sind. Im folgenden Kapitel wird das konzeptionelle Vorgehen beschrieben. Dabei werden spezifische Anforderungen an das Konzept gestellt und Randbedingungen formuliert, die dazu dienen, den Anwendungsbereich des Konzepts klar zu definieren.

5 Konzeptionelles Vorgehen

In diesem Kapitel werden Anforderungen und Randbedingungen an das Konzept gestellt. Anforderungen helfen die Ziele und Erwartungen an das Konzept genau zu definieren (Hertz 1996). Randbedingungen sind notwendig, um den Anwendungsbereich des Konzepts einzuschränken (Hertz 1996). Zusammenfassend sind Anforderungen und Randbedingungen entscheidend, um sicherzustellen, dass ein Konzept erfolgreich entwickelt, implementiert und verwaltet wird, indem sie die Grundlage für einen strukturierten und zielgerichteten Ansatz bieten. Basierend auf den Anforderungen und Randbedingungen werden die relevanten Aspekte für das Konzept erarbeitet. Zu Beginn der Konzeptionierung der Entscheidungsunterstützung sind somit Anforderungen und Randbedingungen an das Vorhaben und den morphologischen Kasten zu stellen.

5.1 Anforderungen des Konzepts

An die Modellierung realer Problemstellungen werden durch Hertz (1996) mit der Richtigkeit, Zweckmäßigkeit und Zulässigkeit drei Anforderungen gestellt. Darüber hinaus werden zusätzliche Anforderungen an Auswahlverfahren und somit an das zu entwickelnde Konzept ergänzt. Das zu entwickelnde Konzept soll demnach die folgenden Anforderungen erfüllen (Hertz 1996):

- *Richtigkeit:* Zu der Richtigkeit des Konzepts zählt vor allem seine Vollständigkeit. Das Konzept soll alle praxisrelevanten Bedingungen sowie sämtliche Attribute zur Auswahl einer geeigneten Validierungsmethode für Technologiebewertungsverfahren abbilden. Hierfür sind die Grenzen des Konzepts in Form von Annahmen festzulegen.
- *Zweckmäßigkeit:* Die Zweckmäßigkeit bzw. Praktikabilität entspricht dem Komplexitätsgrad des Konzepts. Dieser sollte nicht zu komplex, sondern mit einem klaren Bezug zu dem gegenständlichen Problem modelliert werden. In Bezug auf das zu entwickelnde Auswahlverfahren soll sich dieses trotz der Komplexität der Validierungsmethoden nicht signifikant von bisher entwickelten Auswahlverfahren unterscheiden und als objektive Entscheidungsgrundlage dienen. Des Weiteren ist der Ansatz des Konzepts zweckmäßig, wenn er auf andere praxisrelevante Problembereiche anwendbar und erweiterbar ist.
- *Zulässigkeit:* Im Rahmen des zu entwickelnden Konzepts ist die Zulässigkeit des Konzepts innerhalb der getroffenen Annahmen gegeben. Die Randbedingungen des Konzepts werden im folgenden Abschnitt erläutert.

Neben den inhaltlichen Anforderungen an das zu entwickelnde Konzept werden weitere Grundanforderungen für die Nutzung des Konzepts gestellt:

- *Empirische und formale Richtigkeit:* Die abgeleiteten Aussagen und Empfehlungen des Konzepts müssen widerspruchsfrei, reproduzier- und nachprüfbar sein. Die Aussagen des Konzepts sind mit der Realität hinsichtlich Richtigkeit empirisch zu überprüfen.

- *Vollständigkeit und Transparenz*: Bei der Entwicklung des Konzepts sollen alle wesentlichen Faktoren Berücksichtigung finden, die einen signifikanten Einfluss auf die Ableitung von Aussagen haben. Die Auswahl und Priorisierung der Einflussfaktoren sollen transparent und nachvollziehbar im Rahmen der Konzeptentwicklung dargestellt werden.
- *Handhabbarkeit und Zweckorientierung*: Eine Anwendung des zu entwickelnden Konzepts soll ohne Kenntnis des gesamten Konzeptentwicklungsprozesses durchführbar sein. Die eigenständige Anwendung durch außenstehende Fachleute soll mit möglichst geringem Einarbeitungsaufwand ausführbar sein und eine sichere Ableitung von Aussagen zulassen. Im folgenden Abschnitt erfolgt die Erläuterung der Randbedingungen für das Konzept.

5.2 Randbedingungen des Konzepts

Bevor mit der Entwicklung eines Auswahlverfahrens begonnen werden kann, sind Randbedingungen für das Konzept zu formulieren. Das Konzept dient als Entscheidungsunterstützung zur Auswahl einer geeigneten Validierungsmethode für Technologiebewertungsverfahren. Eine Voraussetzung für die Anwendung des Konzepts ist, dass es sich um ein Technologiebewertungsverfahren für Produktionstechnologien handelt. Dies liegt daran, dass sich das Konzept auf Validierungsmethoden im Kontext von Technologiebewertungsverfahren für Produktionstechnologien spezialisiert. Die Ausgangslage bei Betrachtung der Methoden der Validierung zeigt deutlich, dass nicht für jede spezifisch erarbeitete Ausprägung des morphologischen Kastens eine optimale Zuordnung der Methoden existiert. Um den Komplexitätsgrad einzuschränken, wird sich deshalb nur auf in der Literatur erwähnte Größen bezogen, die zur Unterscheidung der Methoden der Validierung in Betracht kommen. Da das Konzept als ein allgemeingültiges Konzept für die Anwendung in unterschiedlichen Kontexten dienen soll, werden die Gestaltungsparameter so generell wie möglich gefasst und spezifische Gestaltungsparameter nicht im Detail erläutert. Dies wirkt sich negativ auf die exakte Bestimmung einer Validierungsmethode aus, ist jedoch aufgrund der breiten Anwendung und Einfachheit unumgänglich. Das Konzept bezieht sich zudem ausschließlich auf die in der systematischen Literaturrecherche ermittelten Validierungsmethoden. Weitere Validierungsmethoden, die bei der systematischen Literaturrecherche nicht erarbeitet wurden, werden in dem Konzept nicht berücksichtigt.

Im folgenden Kapitel wird das Konzept unter Berücksichtigung der formulierten Anforderungen und Randbedingungen entwickelt. In diesem Kontext erfolgt zunächst eine Beschreibung des Vorgehens sowie eine kurze Zusammenfassung der theoretischen Grundlagen, um anschließend die Entscheidungsunterstützung zu entwickeln.

6 Konzeptionierung der Entscheidungsunterstützung

In diesem Kapitel wird das Konzept zur Entscheidungsunterstützung für die Auswahl einer geeigneten Validierungsmethode für Technologiebewertungsverfahren entwickelt. Die Ermittlung der relevanten Schlüsselemente ist die Voraussetzung für die Durchführung des angestrebten Auswahlverfahrens. Hierbei sollen beispielsweise die Einflüsse der Charakteristika eines Technologiebewertungsverfahrens auf die Auswahl einer Validierungsmethode verglichen werden, um Schlussfolgerungen hinsichtlich der Anwendbarkeit der Methoden zu ziehen.

In Kapitel 2 Grundlagen der Technologiebewertung und Kapitel 3 Grundlagen der Validierung wurde auf die Notwendigkeit der Validierung von Technologiebewertungsverfahren eingegangen. Eine Betrachtung der Ansätze der Technologiebewertung, u. a. als Bestandteil des Technologiemanagementprozesses sowie der Kriterien für die Bewertung von Produktionstechnologien ist erfolgt. Technologiebewertungen werden in jeder Phase des Technologiemanagement-Prozesses angewendet und bilden einen essenziellen Schritt in der Technologieplanung und -strategieentwicklung (vgl. Abschnitt 2.2). Die Kriterien für die Bewertung von Produktionstechnologien lassen sich grob in die vier übergeordneten Kategorien Wirtschaftlichkeitsbewertung unter Unsicherheit, Technische Machbarkeit, Reifegradbewertung und Potentialbewertung unterteilen, wobei innerhalb der Kategorien weitere Kriterien zur Bewertung existieren (vgl. Abschnitt 2.3). Validierung dient im Hinblick auf ein Technologiebewertungsverfahren als Bestätigung der Gültigkeit des Verfahrens (vgl. Abschnitt 3.2). In diesem Zusammenhang werden Aspekte wie beispielsweise die Überprüfung der fundamentalen Annahmen und Parameter in der Verfahrensentwicklung oder die Überprüfung der Konsistenz der antizipierten Ergebnisse mit den tatsächlichen Evaluierungsergebnissen untersucht (vgl. Abschnitt 3.2). Um derartige Sachverhalte zu bewerten, werden Validierungsmethoden herangezogen (vgl. Abschnitt 4.2). Die Validierungsmethoden, die dem aktuellen Stand der Technik entsprechen und im Großteil der Technologiebewertungsverfahren angewendet werden, wurden bei der systematischen Literaturrecherche identifiziert und beschrieben (vgl. Abschnitt 4.2). Basierend auf den theoretischen Grundlagen und den ausgewählten Validierungsmethoden wird das Konzept im Folgenden erarbeitet.

In einem ersten Schritt werden dahingehend die Schlüsselemente identifiziert. Diese werden in einem vereinfachten Ablaufschema zusammengefasst, um eine chronologische Abfolge der Auswahl Schritte darzustellen. Im zweiten Schritt werden die Schlüsselemente analysiert, um die spezifischen Abhängigkeiten und Verbindungen zwischen Technologiebewertungsverfahren und der Auswahl einer geeigneten Validierungsmethode zu erläutern. Dazu werden aus den Schlüsselementen Schlüsselkomponenten extrahiert, die genauer analysiert werden. Abschließend wird ein morphologischer Kasten genutzt, um die identifizierten Schlüsselkomponenten zu zerlegen und in ihre grundlegenden Charakteristika zu unterteilen.

6.1 Beschreibung des Ablaufschemas

Im Folgenden wird der erste Schritt der Entscheidungsunterstützung genauer erläutert. Das ausgehende Problem des zu entwickelnden Konzepts ist die Auswahl einer geeigneten Validierungsmethode für Technologiebewertungsverfahren. Anwender des Konzepts sehen sich folglich einer Problemstellung oder Ausgangssituation gegenüber, in der sie bestrebt sind, ein intern entwickeltes oder existierendes Technologiebewertungsverfahren zu validieren. Dabei soll die Sicherheit der Anwendung und der Ergebnisse, die erzielt werden sollen, gewährleistet werden. Zu Beginn des Auswahlprozesses ist somit eine kurze Beschreibung der Problem- bzw. Ausgangssituation für ein grundlegendes Verständnis erforderlich. Wichtige Aspekte sind in diesem Zusammenhang eine grobe Zielbeschreibung des Bewertungsverfahrens, die Art der Technologie, die bewertet werden soll, sowie die Zielgruppe der Validierung.

Tabelle 9: Ausgehendes Problem des Konzepts

Problemstellung und Beschreibung der Ausgangssituation

Das zweite Schlüsselement bilden die Datenlage sowie das Vorhandensein von Ressourcen. Ein wesentlicher Aspekt für die Auswahl einer geeigneten Validierungsmethode ist die Datenlage sowie das Vorhandensein von Ressourcen (vgl. Abschnitt 4.2). Validierungsgruppen, wie beispielsweise die datengetriebene oder prädiktive Validierung, basieren auf der Nutzung von Daten und Ergebnissen, um die Validität eines Technologiebewertungsverfahrens zu untersuchen (vgl. Abschnitt 4.2). In einem ersten Schritt wird dahingehend kurz auf das Thema Datenlage eingegangen und ein mögliches Vorgehen zur Bewertung vorgestellt. Darüber hinaus werden weitere Ressourcen, die einen Einfluss auf die Auswahl einer Validierungsmethode haben, betrachtet.

Ein grundlegendes Problem der ungenauen Validierung von Technologiebewertungsverfahren ist die mangelhafte Datenlage beispielsweise von historischen Daten oder Validierungsstudien (vgl. Abschnitt 3.2). Bei einer undurchsichtigen Datengrundlage erfolgt die Validierung von Technologiebewertungsverfahren oftmals auf Erfahrungen oder auf Wissen der Mitarbeiter (vgl. Abschnitt 4.2). Eine Anwendung von möglicherweise anderen geeigneten Validierungsmethoden bleibt dementsprechend aus, u. a. im Hinblick auf die Unwissenheit gegenüber den Methoden. Dadurch können beispielsweise falsche Einschätzung durch Mitarbeiter oder Experten entstehen, die aufgrund mangelnder Informationen über das Verfahren entstehen. Die vorhandene Datenlage ist in diesem Kontext für die Unterscheidung bzw. der Beurteilung der Möglichkeit der Implikation von Validierungsmethoden bei Technologiebewertungsverfahren von zentraler Bedeutung (vgl. Abschnitt 3.2). Methoden der datengetriebenen Validierung zeigen erst ihre volle Wirksamkeit, wenn sie durch eine Kombination aus Datenanalysen und der anschließenden Validierung der Ergebnisse angewendet werden (vgl. Abschnitt 4.2).

Ein weiteres Problem, das mit der Datenlage einhergeht, ist die vorhandene Datenqualität und Datenreife. Die Anwendung von Methoden der Validierung kann eingeschränkt sein, wenn die Qualität der Daten nicht ausreichend ist (vgl. Abschnitt 4.2). Zur Einschätzung der Datenlage werden in der Literatur Datenreifegradmodelle eingesetzt, um die Datenqualität und Datenreife

zu bewerten (Hildebrand et al. 2018). Datenqualität bezieht sich auf das gesamte Spektrum der Qualitätsmerkmale eines Datensatzes in Bezug auf dessen Eignung, vordefinierte und implizite Anforderungen zu erfüllen (Hildebrand et al. 2018). Hierbei ist insbesondere die inhaltliche Datenqualität (Korrektheit der Datenwerte) von Bedeutung. Die inhaltliche Datenqualität beinhaltet Kriterien der Korrektheit (Vollständigkeit, Eindeutigkeit und Genauigkeit) sowie die Fehlerfreiheit der Daten eines isoliert betrachteten Feldes (Hildebrand et al. 2018). Qualitätsaussagen zur Datenspezifikation beziehen sich auf die Existenz, Verfügbarkeit und Aktualität einer Dokumentation, die Vollständigkeit der beschriebenen Objekte sowie die Verständlichkeit der Beschreibung (Hildebrand et al. 2018). Die Ansätze zur Bewertung der Datenqualität reichen von subjektiven Qualitätseinschätzungen der Datenanwender bis hin zu Analysen des Datenbestandes anhand komplexer Datenqualitätsmetriken (Hildebrand et al. 2018). Für die Einschätzung des Konzepts wird hierbei eine subjektive Qualitätseinschätzung in Erwägung gezogen. Allerdings ist zu erwähnen, dass die subjektive Einschätzung der Datenlage durch die Nutzer zu Bewertungsproblemen führen kann, da dadurch unterschiedliche Einschätzungen resultieren können. Für die subjektive Einschätzung der Datenlage bieten sich Experteninterviews mit qualifizierten Arbeitskräften an. Bei Experteninterviews wird der Interviewte als Lieferant von Informationen befragt (Hildebrand et al. 2018).

Ein Beispiel für eine mögliche Darstellung zur Messung der Datenqualität ist in Tabelle 10 gegeben. Hierbei können die oben genannten Kriterien Existenz, Verfügbarkeit, Aktualität, Vollständigkeit, Verständlichkeit und Eindeutigkeit der Daten herangezogen werden.

Tabelle 10: Beispiel einer Bewertungsmetrik für Daten

Kriterien	Bewertungsmetrik				
Existenz	-	-/o	o	o/+	+
Verfügbarkeit	-	-/o	o	o/+	+
Aktualität	-	-/o	o	o/+	+
Vollständigkeit	-	-/o	o	o/+	+
Verständlichkeit	-	-/o	o	o/+	+
Eindeutigkeit	-	-/o	o	o/+	+

Zur Einschätzung der unterschiedlichen Kriterien wird eine vereinfachte Darstellung mit den Ausprägungen (-), (-/o), (o), (o/+) und (+) angenommen. (-) beschreibt hierbei, dass das Kriterium nicht erfüllt ist. Die Einschätzung (+) beschreibt, dass das Kriterium vollständig zutrifft. Diese Einteilung dient nur als grobe Übersicht über die Datenlage. Die Beschaffenheit der verfügbaren Daten beeinflusst maßgeblich die Auswahl einer Validierungsmethode, da spezifische Validierungsmethoden den Zugang zu entsprechenden Datensätzen erfordern. (vgl. Abschnitt 4.2).

Neben der Datenlage ist die Verfügbarkeit von weiteren Ressourcen zur Implementierung einer Validierungsmethode notwendig (vgl. Abschnitt 4.2). Je höher die Anforderungen an die

Validierung eines Verfahrens, desto höher sind die Kosten der Methodenentwicklung (Landry et al. 1983). Ressourcen, die die Auswahl einer Validierungsmethode beeinflussen, beinhalten notwendige Fachkenntnisse für die Methode, die Kosten sowie die zeitliche Anforderung einer Methode (vgl. Abschnitt 4.2). Einige Validierungsmethoden erfordern spezialisierte Fähigkeiten, Datensätze oder Experimente und Analysen, die eine Auseinandersetzung mit der Validierungsmethode erfordern (vgl. Abschnitt 4.2). Darüber hinaus ist die Zeit, die für die Durchführung der Validierung benötigt wird, ein entscheidender Faktor, der je nach Validierungsmethode variieren kann (vgl. Abschnitt 4.2). Der finanzielle Rahmen zur Anwendung von Validierungsmethoden kann zudem beschränkt sein, wodurch umfangreiche und kostspielige Validierungsmethoden oftmals nicht in Betracht gezogen werden, da diese spezielle Ausrüstung, Software oder Fachpersonal erfordern (vgl. Abschnitt 4.2). Daher sollte die Auswahl einer Validierungsmethode nicht nur auf der methodischen Eignung basieren, sondern zusätzlich die verfügbaren Ressourcen angemessen berücksichtigen. Die Betrachtung der Datenlage und der erwähnten Ressourcen Fachwissen, Zeit und Kosten bildet dahingehend den zweiten Aspekt des Konzepts (vgl. Tab. 11).

Tabelle 11: Zweiter Aspekt des Konzepts

Bewertung der Datenlage und verfügbaren Ressourcen

Ein dritter Aspekt, der im Rahmen der Auswahl einer geeigneten Validierungsmethode betrachtet wird, ist das Ziel, dass mit der Validierung verfolgt wird. Im Zuge einer Validierung eines Technologiebewertungsverfahrens sind verschiedene Gesichtspunkte zu beachten, damit das Verfahren verlässliche und aussagekräftige Ergebnisse liefert (vgl. Abschnitt 3.2). Tabelle 12 stellt den dritten Aspekt des Konzepts dar.

Tabelle 12: Dritter Aspekt des Konzepts

Definieren der Validierungsziele

Hierbei ist die Frage zu beantworten, welche Aspekte des Technologiebewertungsverfahrens als Validierungsziel definiert werden sollen. Um beispielsweise eine ganzheitliche Validierung eines Technologiebewertungsverfahrens zu erreichen, ist die Berücksichtigung sämtlicher Validierungsziele unerlässlich, welches in der Praxis kaum umsetzbar ist (vgl. Unterabschnitt 3.1.2). Abbildung 26 zeigt mögliche Ziele, die bei der Validierung von Technologiebewertungsverfahren in Betracht gezogen werden können.

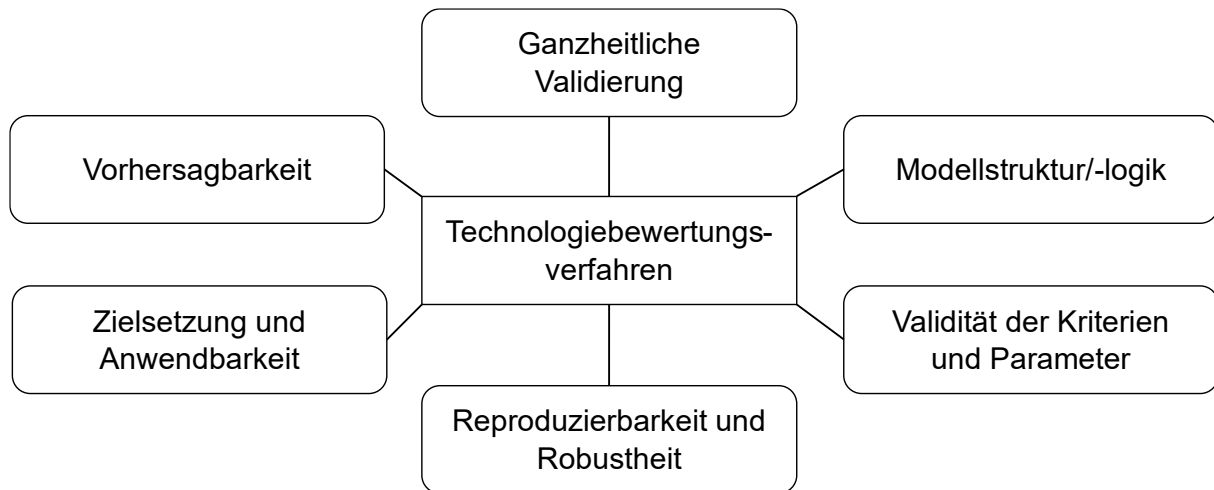


Abbildung 26: Validierungsziele

Eine ganzheitliche Validierung bezieht sich auf sämtliche Aspekte, die in Abbildung 26 dargestellt sind. Im Kontext der Reproduzierbarkeit und Robustheit eines Technologiebewertungsverfahrens steht das Ziel, die Änderung der Faktoren auf die Verfahrensergebnisse zu untersuchen, um sicherzustellen, dass diese realistisch und konsistent sind (vgl. Unterabschnitt 3.1.2). Darüber hinaus könnte die Robustheit gegenüber Variabilität in den Eingangsdaten oder anderen Einflussfaktoren bewertet werden (vgl. Abschnitt 4.2). Die Prüfung der Modellstruktur/-logik fokussiert sich darauf, den Aufbau eines Technologiebewertungsverfahrens wie beispielsweise eingesetzte Metriken sowie die interne Logik auf Kohärenz und Konsistenz zu analysieren (vgl. Abschnitt 3.2).

Die Validität der Kriterien und Parameter als Validierungsziel beschreibt die Überprüfung der Angemessenheit und Relevanz der ausgewählten Bewertungskriterien für die zu bewertende Technologie (vgl. Abschnitt 2.3). Wenn das Ziel eines Technologiebewertungsverfahrens beispielsweise die Bestimmung des Reifegrades einer Technologie ist, sind Kriterien, die sich auf die Bewertung des Reifegrades beziehen, auf ihre Eignung für das Verfahren zu prüfen. Hierbei ist zudem der von Noh et al. (2017) erwähnte Aspekt der Referenz von Bedeutung, welche gegeben ist, wenn die Indikatoren für die Bewertungskriterien sich gegenseitig ausschließen und erschöpfend für den Zweck der Gesamtbewertung sind (vgl. Abschnitt 3.2). Die Vorhersagbarkeit als Validierungsziel bezeichnet die Bewertung, wie präzise ein Technologiebewertungsverfahren basierend auf den Bewertungskriterien und -parametern die Leistung oder den Erfolg einer Technologie vorhersagen kann (vgl. Abschnitt 4.2). Die Zielsetzung und Anwendbarkeit bezieht sich auf die Kausalität eines Technologiebewertungsverfahrens (vgl. Abschnitt 3.2). In diesem Kontext ist eine klare Definition der Ziele des Technologiebewertungsverfahrens entscheidend sowie die Überprüfung, ob das Verfahren für den beabsichtigten Anwendungsbereich bzw. die definierte Zielstellung geeignet ist (vgl. Abschnitt 3.2). In diesem Zusammenhang beschreibt die Kausalität die Kohärenz der Bewertungsergebnisse mit dem Bewertungszweck und ist das wichtigste Validierungsziel, um ein Bewertungsverfahren zu verbessern (vgl. Abschnitt 3.2).

Zusammenfassend bezieht sich der dritte Aspekt des Konzepts auf die Beschreibung eines geeigneten Validierungsziels für ein Technologiebewertungsverfahren. Der Einfluss der

Validierungsziele auf die Auswahl einer geeigneten Validierungsmethode wird im späteren Verlauf durch eine Betrachtung der Kohärenz der Ziele der Validierungsmethoden mit denen eines Technologiebewertungsverfahrens genauer betrachtet. Eine klare Definition der Validierungsziele ist notwendig, damit die Validierung den beabsichtigten Zweck erfüllt. Dadurch wird eine klare Richtung für den Auswahlprozess geschaffen und eine klare Kommunikation bezüglich des gemeinsamen Verständnisses über die Ziele der Validierung geschaffen.

Der vierte Aspekt des Konzepts beinhaltet die Erarbeitung der Charakteristika eines Technologiebewertungsverfahrens. Anhand dieser wird der Zusammenhang für die Auswahl einer geeigneten Validierungsmethode hergestellt, indem die Eigenschaften der Validierungsmethoden in den Kontext der Charakteristika gestellt werden. Darüber hinaus werden noch weitere Attribute ergänzt wie beispielsweise die des Zeitpunktes, an dem die Validierung eines Technologiebewertungsverfahrens erfolgen soll oder die Notwendigkeit der Genauigkeit einer Validierung. Tabelle 13 stellt den vierten Aspekt des Konzepts dar.

Tabelle 13: Vierter Aspekt des Konzepts

Betrachtung der Charakteristika des Technologiebewertungsverfahrens

Das Grundverständnis für ein Technologiebewertungsverfahren beinhaltet die Betrachtung folgender Charakteristika, die für das Konzept untersucht werden:

- Zielsetzung des Bewertungsverfahrens (vgl. Abschnitt 2.2)
- Bewertungskriterien und -parameter (vgl. Abschnitt 2.3 & 3.2)
- Berücksichtigung von Unsicherheiten (vgl. Abschnitt 2.3)
- Eingesetzte Bewertungsmethoden (vgl. Abschnitt 2.3)
- Komplexität und Struktur des Verfahrens (vgl. Abschnitt 2.3 & 3.2)
- Art der Technologie (vgl. Abschnitt 2.2)

Die Berücksichtigung dieser Charakteristika ist von entscheidender Bedeutung, um eine geeignete Validierungsmethode auszuwählen. Diese muss den Anforderungen des Technologiebewertungsverfahrens gerecht werden um zuverlässige Ergebnisse bezüglich der Validität und Effektivität des Verfahrens liefern. Eine ausführliche Betrachtung der Zusammenhänge zwischen den Charakteristika eines Technologiebewertungsverfahrens und der Eignung einer Validierungsmethode erfolgt im späteren Verlauf der Arbeit durch die Darstellung in einem morphologischen Kasten. Dabei werden die Validierungsgruppen verschiedenen Ausprägungen der Charakteristika eines Technologiebewertungsverfahrens zugeordnet.

In einem nächsten Schritt erfolgt basierend auf den ausgewählten Charakteristika im morphologischen Kasten eine Bewertung der Charakteristika des Technologiebewertungsverfahrens. Hierfür werden die Ergebnisse des morphologischen Kastens analysiert und ausgewertet. Tabelle 14 stellt den fünften Aspekt des Konzepts dar.

Tabelle 14: Fünfter Aspekt des Konzepts

Bewertung der Charakteristika des Technologiebewertungsverfahrens

Im Kontext der erarbeiteten und bewerteten Charakteristika eines Technologiebewertungsverfahrens werden in einem weiteren Schritt die wesentlichen Ergebnisse zusammengefasst. Hierbei werden die vorherigen Schritte mit der Auswertung der Datenlage und der Definition der Validierungsziele erneut dargestellt, um die anschließende Bewertung der Eignung einer Validierungsmethode vorzunehmen. Tabelle 15 stellt den sechsten Aspekt des Konzepts dar.

Tabelle 15: Sechster Aspekt des Konzepts

Zusammenfassung der Ergebnisse

Durch eine sequenzielle Betrachtung dieser Aspekte kann eine fundierte Empfehlung für die Auswahl einer Validierungsmethode abgeleitet werden. In diesem abschließenden Schritt erfolgt somit die Bewertung der Eignung einer Validierungsmethode für ein vorliegendes Technologiebewertungsverfahren anhand der vorher ermittelten Ergebnisse.

Tabelle 16: Siebter Aspekt des Konzepts

Bewertung der Eignung einer Validierungsmethode

Dies erfolgt durch einen Vergleich der bewerteten Ausprägungen des morphologischen Kastens mit den erarbeiteten Ausprägungen der Validierungsmethoden, um eine geeignete Validierungsmethode auszuwählen. Die beschriebenen Aspekte des Konzepts bilden das Ablaufschema, welches in dieser Arbeit entwickelt wird.

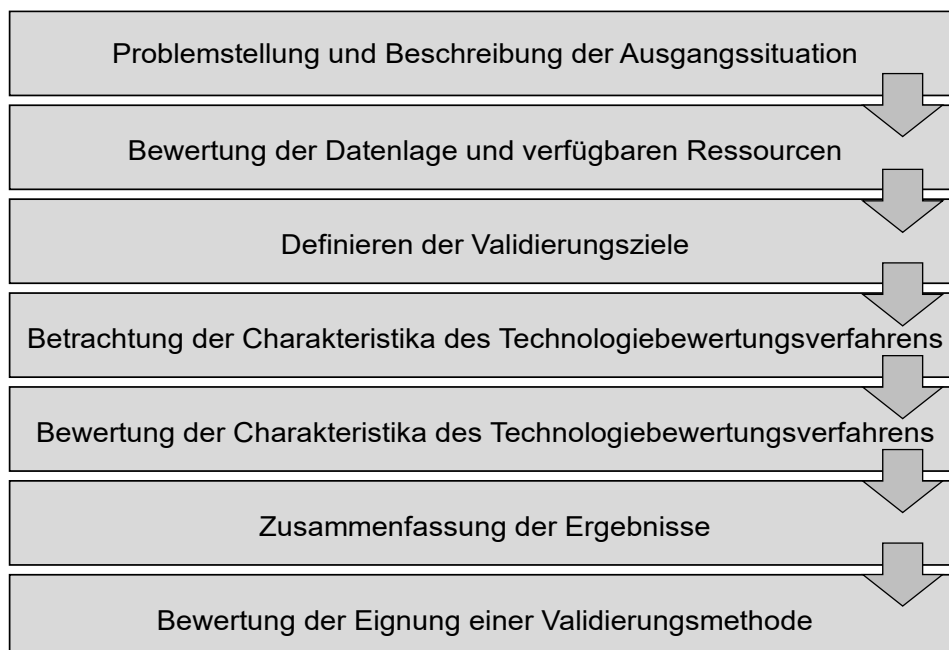


Abbildung 27: Ablaufschema zur Auswahl einer geeigneten Validierungsmethode für Technologiebewertungsverfahren

Abbildung 27 zeigt das vollständige Ablaufschema zur Auswahl einer geeigneten Validierungsmethode. Das Ablaufschema besteht aus sieben Schritten, die nacheinander betrachtet werden. Der nächste Abschnitt beschäftigt sich mit der Ermittlung der Abhängigkeiten zwischen dem in Abbildung 27 beschriebenen Ablaufschema und den in Abschnitt 4.2 ermittelten Validierungsmethoden aus der systematischen Literaturrecherche. Dabei wird analysiert wie beispielsweise die Charakteristika eines Technologiebewertungsverfahrens oder die Datenlage sich auf die Auswahl einer geeigneten Validierungsmethode auswirken.

6.2 Ermittlung der Abhängigkeiten

Die Ermittlung der relevanten Abhängigkeiten zwischen den in Abschnitt 6.1 beschriebenen Aspekten und der Auswahl einer geeigneten Validierungsmethode ist die Voraussetzung für die Entwicklung des Konzepts. In diesem Schritt sollen die Einflüsse der Charakteristika eines Technologiebewertungsverfahrens sowie Bedingungen wie die Datenlage, verfügbare Ressourcen und Validierungsziele auf die Auswahl einer Validierungsmethode untersucht werden. Basierend darauf werden Aussagen zu der Eignung einer Validierungsmethode abgeleitet. Im Rahmen der Untersuchung steht die Erarbeitung eines morphologischen Kastens im Fokus, wobei geeignete Kriterien für den Kasten erarbeitet werden müssen. Dafür werden spezifisch die Eigenschaften sowie Vor- und Nachteile der Validierungsgruppen in Bezug auf die Eigenschaften von Technologiebewertungsverfahren kontextualisiert. Der folgende Unterabschnitt 6.2.1 betrachtet die Ressourcenanforderungen der Validierungsmethoden.

6.2.1 Ressourcenanforderungen der Validierungsmethoden

Eine Grundanforderung für die Auswahl einer geeigneten Validierungsmethode ist die vorhandene Datenlage sowie die verfügbaren Ressourcen (vgl. Abschnitt 6.1). Diese haben einen wesentlichen Einfluss auf die Anwendung einer Validierungsmethode (vgl. Abschnitt 4.2). Im Folgenden werden dahingehend die ermittelten Validierungsgruppen hinsichtlich der Datennotwendigkeit sowie der Ressourcen Kosten und Zeit bewertet. Für die Einschätzung der Datenlage wird exemplarisch Tabelle 10 als Bezugstabelle hinzugezogen.

In Abschnitt 3.2 wurden schon wichtige Daten, die für die Validierung von Technologiebewertungsverfahren von Bedeutung sind, erwähnt. Dazu zählen u. a. historische Daten oder Daten aus Validierungsstudien, die für die Anwendung von datengetriebenen Validierungsmethoden genutzt werden (vgl. Abschnitt 4.2). Datengetriebene Validierungsmethoden können interne sowie zusätzlich externe Daten verwenden (vgl. Abschnitt 4.2). Die Methoden basieren auf der Analyse von Daten, um Trends oder Muster zu erkennen (vgl. Abschnitt 4.2). Daher besteht bei der Anwendung von datengetriebenen Validierungsmethoden eine Abhängigkeit von der Datenverfügbarkeit. Ohne verfügbare Daten sind die Methoden nicht anwendbar. Eine unzureichenden oder qualitativ minderwertigen Datenbasis kann zudem die Zuverlässigkeit und Repräsentativität der erzielten Ergebnisse für die Realität beeinträchtigen (vgl. Abschnitt 4.2). Die Einschätzung einer ungenügenden Datenlage (kleiner als +) anhand der Bewertungsmetrik in Tabelle 10 hat zur Folge, dass die datengetriebenen Validierungsmethoden ausgeschlossen werden müssen. Im Kontrast dazu ermöglicht eine umfangreiche und hochwertige Datenbasis die Anwendung datengetriebener Validierungsmethoden (vgl. Abschnitt 4.2).

Bezogen auf interne Validierungsmethoden spielt die Datenlage eine entscheidende Rolle, da sie die Grundlage für die Durchführung von internen Tests sowie der Beurteilung der Validität der Ergebnisse bildet (vgl. Abschnitt 4.2). Bei der internen Validierung wird beispielsweise die Auswirkung einer unabhängigen Variable auf eine abhängige Variable anhand interner Daten untersucht. Interne Validierungsmethoden konzentrieren sich auf die Validierung des zugrunde liegenden Verfahrens oder Algorithmus als auf die Datengrundlage selbst. Dies bedeutet, dass die Qualität der Daten weniger kritisch ist, solange sie repräsentativ für das zu validierende Verfahren sind. Da interne Validierungsmethoden in einem kontrollierten Umfeld durchgeführt werden, sind externe Einflüsse auf die Daten weniger problematisch (vgl. Abschnitt 4.2). Dies steht im Gegensatz zu beispielsweise datengetriebenen Methoden, bei denen die Daten oft von externen Quellen stammen und möglicherweise von vielen Faktoren beeinflusst werden können. Vor diesem Hintergrund ist zur Gewährleistung einer adäquaten Validierung für interne Validierungsmethoden eine ausreichende Datenbasis (größer als o/+ in Tabelle 10) notwendig. Zusammenfassend bedeutet dies nicht, dass die Datenlage bei internen Validierungsmethoden nicht weniger relevant ist, sondern dass sie weniger kritisch als bei datengetriebenen Methoden ist (vgl. Abschnitt 4.2).

Bei einer unzureichenden internen Datenlage werden häufig Daten aus externen Quellen zur Validierung herangezogen (vgl. Abschnitt 4.2). Die Verfügbarkeit geeigneter Daten aus verschiedenen Umgebungen oder Regionen ermöglicht Anwendern, externe Validierungen in vielfältigen Kontexten durchzuführen und die Übertragbarkeit ihrer Ergebnisse zu evaluieren (vgl. Abschnitt 4.2). Darüber hinaus bietet eine umfassende externe Datenlage eine bessere Analyse und Interpretation der Faktoren außerhalb des unmittelbaren Forschungsrahmens. Diese helfen zu verstehen und zu berücksichtigen, wie die Faktoren die potentielle Anwendbarkeit der erzielten Resultate beeinflussen können (vgl. Abschnitt 4.2). Die Datenlage spielt, mit Bezug auf die verfügbaren externen Daten, bei den externen Validierungsmethoden eine wichtige Rolle (vgl. Abschnitt 4.2). Für einen möglichen Vergleich können ähnliche Beispiele aus den Quellen der Literatur gezogen werden wie es bei der Kreuzmodellvalidierung und der empirischen Validierung der Fall ist (vgl. Abschnitt 4.4). Daher wird die Notwendigkeit von Daten geringer eingeschätzt als bei der datengetriebenen und internen Validierung (größer als o in Tabelle 10).

Bei Methoden der informellen Validierung spielt die Datenlage eine andere, untergeordnete Rolle. Informelle Validierungsmethoden basieren auf der Einschätzung von Experten oder Fachleuten (vgl. Abschnitt 4.2). Hierbei hat die Verfügbarkeit von Daten eine unterstützende Funktion, indem eine fundiertere Einschätzung gewährleistet wird (vgl. Abschnitt 4.2). Es erfolgt eine Unterstützung der Kommunikation mit Stakeholdern, indem eine gemeinsame Grundlage für Diskussionen über die Validität des Technologiebewertungsverfahrens geschaffen wird (vgl. Abschnitt 4.2). Da die Methoden nicht abhängig von der Datenverfügbarkeit sind, kann vor diesem Hintergrund eine Validierung unabhängig von verfügbaren Daten erfolgen. Daher wird die Notwendigkeit von Daten als gering eingeschätzt (alle Ausprägungen in Tabelle 10).

Für Methoden der prädiktiven Validierung ist die Datenlage von Wichtigkeit, um die Vorhersagegenauigkeit eines Technologiebewertungsverfahrens zu bewerten (vgl. Abschnitt 4.2). Eine unzureichende Datenlage kann zu verzerrten oder ungenauen Vorhersagen führen und somit die Zuverlässigkeit und Validität des Bewertungsverfahrens beeinträchtigen (vgl. Abschnitt 4.2). Daher ist eine ausgeprägte Datenlage insbesondere bei der Hypothesen Validierung und Schlussfolgerung eine wesentliche Voraussetzung für die prädiktive Validierung von Technologiebewertungsverfahren (vgl. Abschnitt 4.2). Jedoch können die Vorhersagen zudem basierend auf qualitativen Einschätzungen erfolgen. Beispielsweise basiert die Methode von Huppel und Schaubroeck (2022) auf einer qualitativen Checkliste und ist weniger auf der Nutzung von Daten ausgerichtet (vgl. Abschnitt 4.2). Daher wird die Notwendigkeit von Daten für die Ausprägungen größer als 0 in Tabelle 10 eingeschätzt. Tabelle 17 zeigt zusammenfassend die eingeschätzten notwendigen Datenlagen für die verschiedenen Validierungsgruppen, basierend auf den Eigenschaften der Gruppen.

Tabelle 17: Datenanforderungen der Validierungsgruppen

Validierungsgruppe	Datengetrieben	Intern	Extern	Informell	Prädiktiv
Notwendigkeit von Daten	+	o/+ bis +	o bis +	- bis +	o bis +

Im Rahmen des Konzepts sind hierbei die verfügbaren internen und externen Daten zu überprüfen. Neben der Datenlage wurden in Abschnitt 6.1 der Entscheidungsunterstützung weitere Ressourcen genannt. Der zeitliche Aufwand sowie finanzielle Aufwand der Validierungsmethoden variieren in Abhängigkeit von mehreren Aspekten, u. a. von der Komplexität des zugrunde liegenden Bewertungsverfahrens sowie der Vorgehensweise der Validierungsmethode (vgl. Abschnitt 4.2). Im Folgenden wird dahingehend der zeitliche sowie finanzielle Aufwand der Validierungsmethoden bewertet.

Datengetriebene Validierungsmethoden sind mit einem hohen Zeitaufwand verbunden (vgl. Abschnitt 4.2). Die zeitaufwendigen Schritte umfassen hierbei die Datensammlung, -analyse und -interpretation (vgl. Abschnitt 4.2). Zudem hängt die Dauer zusätzlich von der Verfügbarkeit qualitativer Daten ab, wodurch möglicherweise eine Datenaufbereitung notwendig ist (vgl. Abschnitt 4.2). In einigen Fällen kann die Validierung schnell durchgeführt werden, wenn umfangreiche Daten vorhanden sind und die Analysemethoden etabliert sind. Zusammenfassend wird der Zeitaufwand als hoch eingestuft.

Interne Validierungsmethoden erfordern, dass ein Technologiebewertungsverfahren anhand interner Daten getestet wird (vgl. Abschnitt 4.2). Dies kann Zeit in Anspruch nehmen, da die Validierungsmethode möglicherweise an verschiedene interne Szenarien und Bedingungen angepasst werden muss. Analog zu den datengetriebenen Validierungsmethoden erfordern hier die Schritte der Datensammlung, Analyse und Interpretation der Daten einen erheblichen Zeitaufwand (vgl. Abschnitt 4.2). Interne Validierungsmethoden können jedoch schneller durchgeführt werden als beispielsweise externe Validierungsmethoden, da sie auf internen Daten basieren und weniger Zeit für die Datensuche und -erhebung benötigen (vgl. Abschnitt 4.2). Infolgedessen wird der Zeitaufwand auf moderat bis hoch eingeschätzt.

Externe Validierungsmethoden erfordern den Zugriff auf Datenquellen oder die Zusammenarbeit mit externen Partnern, die Daten bereitstellen (vgl. Abschnitt 4.2). Das Sammeln, Aufbereiten, Analysieren und Integrieren externer Daten stellen zeitaufwändige Prozesse dar. Die Datensammlung kann einen zeitaufwändigen Prozess darstellen, da es möglicherweise erforderlich ist, Daten über einen ausgedehnten Zeitraum zu akkumulieren, um eine hinreichende Datenmenge zu erlangen. Die Analyse der erhobenen Daten erfordert darüber hinaus einen zeitlichen Aufwand für die Durchführung statistischer Tests, den Vergleich zwischen unterschiedlichen Verfahren oder experimentellen Bedingungen (vgl. Abschnitt 4.2). Analyse und Integration sind insbesondere zeitaufwendig, wenn komplexe Datenanalysen erforderlich sind (vgl. Abschnitt 4.2). Zudem kann die Koordination mit externen Partnern zusätzlich Zeit in Anspruch nehmen. Der Zeitaufwand des Prozesses wird daher als hoch eingestuft.

Im Gegensatz dazu sind Methoden der informellen Validierung weniger zeitaufwändig, da sie auf qualitativem Feedback von Experten oder Fachleuten basieren und somit weniger Aufwand benötigen (vgl. Abschnitt 4.2). Jedoch ist zu erwähnen, dass möglicherweise Daten gesammelt werden müssen, um die Einschätzung der Situation zu unterstützen und die Effektivität der Validierung zu steigern. Der Zeitaufwand wird dahingehend als gering bis moderat eingestuft.

Methoden der prädiktiven Validierung erfordern eine längere Zeitspanne, um die definierten Hypothesen und Vorhersagen in einem Technologiebewertungsverfahren mit tatsächlichen Ergebnissen zu vergleichen (vgl. Abschnitt 4.2). Dieser Prozess beginnt oft mit der zeitaufwändigen Hypothesenbildung (vgl. Abschnitt 4.2). Die Validierung beansprucht Zeit sowohl für die Datenerhebung, -analyse und -interpretation sowie für die Realisierung langfristiger Prognosen. Prognosen benötigen einen zusätzlichen Zeitaufwand, bevor eine Validierung erfolgt. Beispielsweise erfolgt die Validierung der Hypothesen bezüglich des Marktpotentials für die nächsten fünf Jahre erst nach Ablauf dieses Zeitraums, gemäß dem Technologiebewertungsverfahren, dass das Marktpotential bewertet. Entgegen diesem Kontext steht die qualitative prädiktive Validierungsmethode (vgl. Abschnitt 4.2). Die Umsetzung von Interviews, Beobachtungen oder anderen qualitativen Methoden beansprucht Zeit, während die Analyse dieser Daten eine detaillierte Interpretation erfordert, was einen zusätzlichen Zeitaufwand bedingt (vgl. Abschnitt 4.2). Daher wird der Zeitaufwand für Methoden der prädiktiven Validierung als hoch eingeschätzt. Tabelle 18 stellt die Zeitaufwände der Validierungsgruppen dar. Der Zeitaufwand wurde hierbei in die Kategorien gering, moderat und hoch unterteilt.

Tabelle 18: Zeitaufwand der Validierungsgruppen

Validierungsgruppe	Datengetrieben	Intern	Extern	Informell	Prädiktiv
Zeitaufwand	hoch	moderat/ hoch	hoch	gering/ moderat	hoch

Die finanziellen Anforderungen der Validierungsmethoden sind abhängig von Aspekten, die sich auf die Kosten der Anwendung auswirken (vgl. Abschnitt 4.2). Hierbei zählt zum einen der Ressourcenbedarf der Methoden. Einige Validierungsmethoden erfordern erhebliche finanzielle Ressourcen, insbesondere datengetriebene, externe und prädiktive Methoden (vgl.

Abschnitt 4.2). Die Validierungsmethoden benötigen die Beschaffung, Aufbereitung und Analyse von Daten für den Validierungsprozess, insbesondere wenn umfangreiche Datensätze erforderlich sind. Zusätzlich dazu wird häufig auf spezialisierte Software oder Tools zur Datenaufbereitung und -analyse zurückgegriffen, deren Nutzung zusätzliche Kosten verursacht und möglicherweise den Erwerb oder die Lizenzierung erfordert (vgl. Abschnitt 4.2). Zu berücksichtigen sind neben der Ressource Daten zudem der finanzielle Aufwand, der durch Schulungen und die Anstellung von Fachexperten entsteht. Davon sind vor allem komplexe Methoden wie prädiktive Validierungsmethoden oder fortschrittliche statistische Techniken bei den datengetriebenen Validierungsmethoden betroffen (vgl. Abschnitt 4.2). Für die drei erwähnten Validierungsmethoden sind beispielsweise spezialisierte Fachkenntnisse in den Bereichen Datenanalyse und Statistik notwendig. Bei externen Validierungsmethoden entstehen im Falle einer Datenunzulänglichkeit oder einer Zusammenarbeit mit externen Partnern Kosten für den Zugriff auf externe Datenquellen (vgl. Abschnitt 4.2). Vor diesem Kontext werden die finanziellen Anforderungen der Validierungsmethoden als hoch eingeschätzt.

Interne Validierungsmethoden können kostengünstiger sein im Vergleich zu den vorher genannten Validierungsmethoden, da sie auf vorhandenen Ressourcen wie beispielsweise interne Datenbanken oder Fachkenntnisse innerhalb eines Unternehmens basieren (vgl. Abschnitt 4.2). Die interne Datensammlung ist darüber hinaus ressourcenschonender (vgl. Abschnitt 4.2). Hierbei fallen die Kosten hauptsächlich für interne Ressourcen wie beispielsweise die Mitarbeiterzeit an. Interne Validierungsmethoden können oft mit einem kürzeren Zeitrahmen durchgeführt werden, was die Kosten für die Datenerhebung, -analyse und -interpretation verringert (vgl. Abschnitt 4.2). Die Durchführung interner Validierungsmethoden erfordert zudem weniger externe Unterstützung (vgl. Abschnitt 4.2). Der finanzielle Aufwand wird somit auf moderat bis hoch eingeschätzt.

Informelle Validierungsmethoden sind kostengünstig, da sie weniger ressourcenintensiv sind (vgl. Unterabschnitt 3.1.2). Die Kosten können sich hauptsächlich auf die interne Arbeitszeit der beteiligten Personen beschränken. Eine umfassende Datenanalyse und -auswertung ist nicht notwendig für die Anwendung der Methoden (vgl. Abschnitt 4.2). Dies reduziert die Notwendigkeit für teure Datenerfassungs- oder Datenanalysetools sowie den Bedarf an externen Datenquellen. Darüber hinaus entfallen potentiell hohe Kosten für die Entwicklung oder Implementierung komplexer Modelle oder Algorithmen (vgl. Abschnitt 4.2). Der finanzielle Aufwand wird dahingehend als gering eingestuft.

Die Kosten für Validierungsmethoden können aufgrund finanzieller Aspekte wie dem Vorhandensein von Fachwissen oder der Notwendigkeit der Datenaufbereitung stark variieren. Daher ist der finanziellen Anforderung eine geringere Gewichtung als den anderen Ressourcen zuzuordnen. Darüber hinaus wird das Vorhandensein von Fachkräften, welche als weitere Ressource genannt wurde, nicht explizit in das Konzept integriert. Diese wurden bei der Einschätzung der finanziellen Anforderungen nicht mitberücksichtigt, da eine Einschätzung über das Know-how sich als schwierig darstellt. Beispiele hierfür sind die Schulung interner oder das Akquirieren externer Fachkräfte. Tabelle 19 zeigt die Einschätzung der finanziellen Anforderungen der Validierungsmethoden.

Tabelle 19: Finanzielle Anforderung der Validierungsgruppen

Validierungsgruppe	Datengetrieben	Intern	Extern	Informell	Prädiktiv
Finanzielle Anforderung	hoch	moderat/ hoch	hoch	gering	hoch

Die finanziellen Anforderungen wurden in die Kategorien gering, moderat und hoch eingestuft und den jeweiligen Validierungsgruppen zugeordnet. Im Folgenden werden die wesentlichen Charakteristika eines Technologiebewertungsverfahrens betrachtet und die Abhängigkeit zu den Validierungsmethoden untersucht.

6.2.2 Zusammenhang von Technologiebewertungsverfahren und Methoden der Validierung

In diesem Unterabschnitt wird der Zusammenhang zwischen den Charakteristika eines Technologiebewertungsverfahrens und der Anwendung von Validierungsmethoden hergestellt. Die wesentlich zu untersuchenden Charakteristika wurden in Abschnitt 6.1 beschrieben. In einem ersten Schritt wird auf den Zeitpunkt eingegangen, an dem die Validierung des Technologiebewertungsverfahrens erfolgen soll (vgl. Abschnitt 3.2). Dafür sind die Begriffe *ex-ante* und *ex-post* zu betrachten (vgl. Abschnitt 3.2). *Ex-ante* Bemühungen beziehen sich darauf, Technologiebewertungsverfahren in der Entwicklung und vor der Nutzung zu validieren (vgl. Abschnitt 3.2). *Ex-post* Bemühungen auf der anderen Seite beziehen sich auf die Anwendung des Technologiebewertungsverfahrens, um das Verfahren anhand der erzielten Ergebnisse zu verbessern (vgl. Abschnitt 2.3). In diesem Kontext ist zu überprüfen, inwiefern Validierungsmethoden schon in der Entwicklungsphase eingesetzt werden können oder erst nach der Entwicklungsphase mit Sicherheit zeigen können, dass ein Technologiebewertungsverfahren valide ist.

Datengetriebene Validierungsmethoden sind für *ex-ante* sowie *ex-post* Bemühungen geeignet (vgl. Abschnitt 4.2). Erkenntnisse aus historischen Daten können verwendet werden, um *ex-ante* Vorhersagen für die Bewertung zukünftiger Technologien zu validieren, die als Grundlage für das Technologiebewertungsverfahren dienen. Messvalidierung kann in diesem Kontext dazu genutzt werden, die Messinstrumente oder Metriken, die im Technologiebewertungsverfahren verwendet werden, auf Genauigkeit und Zuverlässigkeit zu überprüfen (vgl. Abschnitt 4.2). *Ex-post* kann anhand der erzielten Ergebnisse die Messinstrumente erneut validiert werden, um zu gewährleisten, dass die gemessenen Werte konsistent und repräsentativ sind. Datengetriebene Validierungsmethoden eignen sich insbesondere für die *ex-post* Validierung, da sie es ermöglichen, die erzielten Evaluationsergebnisse zu nutzen, um die Wirksamkeit des Verfahrens zu validieren (vgl. Abschnitt 4.2). Die Durchführung von Validierung mittels variabler Parameter und Sensitivitätsanalysen *ex-post* ermöglicht es, die Auswirkungen von Änderungen in den Eingangsparametern auf die Evaluierungsergebnisse des Bewertungsverfahrens zu überprüfen (vgl. Abschnitt 4.2). Statistische Techniken können *ex-ante* und *ex-post* genutzt werden (vgl. Abschnitt 4.2). *Ex-ante* werden statistische Techniken verwendet, um die Validität von Annahmen zu prüfen und die Verfahrensparameter zu schätzen (vgl. Abschnitt 4.2). *Ex-post* werden statistische Techniken angewendet, um die Evaluierungsergebnisse zu

analysieren sowie die Stabilität und Genauigkeit des Verfahrens zu validieren (vgl. Abschnitt 4.2).

Bei Methoden der internen Validierung ist zusätzlich zu den datengetriebenen Methoden die strukturelle Validierung und Konstrukt Validierung hervorzuheben. Die Methoden sind für ex-ante Bemühungen geeignet, um sicherzustellen, dass das Bewertungsverfahren eine angemessene Struktur aufweist und einen kohärenten Rahmen für die Bewertung der Technologie bietet, bevor es tatsächlich angewendet wird (vgl. Abschnitt 4.2). Hierbei tragen die Validierungsmethoden dazu bei, potentielle Schwachstellen im Design des Bewertungsverfahrens im Vorhinein zu erkennen und zu beheben. In diesem Prozess werden die verwendeten Konstrukte oder Dimensionen daraufhin untersucht, ob sie als relevante und angemessene Maßstäbe für die Bewertung der Technologie dienen (vgl. Abschnitt 4.2). Nachfolgend kann eine strukturelle Validierung ex-post erneut durchgeführt werden, um die Konsistenz und Kohärenz der Ergebnisse zu bewerten. Mit der Konstrukt Validierung kann zudem sichergestellt werden, dass die gemessenen Konstrukte tatsächlich das erfassen, was sie messen sollen, um die potentiellen Fehler der ex-ante Validierung zu bewerten (vgl. Abschnitt 4.2).

Die externen Validierungsmethoden setzen sich aus Validierung durch den Vergleich mit anderen Verfahren, empirischer Validierung und experimenteller Validierung zusammen (vgl. Abb. 25). Der Vergleich mit anderen Verfahren kann ex-ante und ex-post angewendet werden. Im Vorhinein kann das Technologiebewertungsverfahren mit ähnlichen Verfahren verglichen werden, beispielsweise hinsichtlich der Struktur und der Parameter, um potentielle Schwachstellen zu identifizieren und zu verbessern (vgl. Abschnitt 4.2). Ex-Post ermöglicht der Vergleich mit anderen Verfahren einen retrospektiven Vergleich der Evaluierungsergebnisse mit denen anderer Verfahren (vgl. Abschnitt 4.2). Bei der empirischen Validierung können empirische Daten aus der Literatur ex-ante genutzt werden, um das Verfahren zu validieren. Ein Beispiel für die empirische Validierung mit Hilfe von Literaturdaten ex-ante bei der Bewertung von Technologien wäre, wenn Forschungsarbeiten oder Fallstudien aus der Literatur verwendet werden. Dadurch können die Annahmen oder Parameter des Technologiebewertungsverfahrens validiert werden bevor es tatsächlich angewendet wird. Dies könnte beispielsweise bedeuten, dass historische Daten über die Leistung oder den Erfolg ähnlicher Technologien aus der Literatur analysiert werden. Insbesondere ist die ex-post Analyse, bei der die Evaluierungsergebnisse des Verfahrens mit realen Daten und Beobachtungen abgeglichen werden, von Bedeutung (vgl. Abschnitt 4.2). Darüber hinaus ist die experimentelle Validierung ex-ante als geeignete Methode anwendbar (vgl. Abschnitt 4.2).

Informelle Methoden eignen sich ex-ante sowie ex-post, indem durch subjektive Einschätzungen das Technologiebewertungsverfahren validiert wird (vgl. Abschnitt 4.2). Während der Entwicklungsphase sind Expertenmeinungen und Audits von Bedeutung (vgl. Abschnitt 4.2). Die Methoden tragen dazu bei, offensichtliche Mängel oder Inkonsistenzen im Verfahren frühzeitig zu identifizieren und zu korrigieren, bevor es weiterentwickelt oder angewendet wird. Audits stellen aufgrund ihrer Einbeziehung der Stakeholder eine bedeutende Validierungsmethode dar, um das Bewertungsverfahren gemäß den vielfältigen Anforderungen zu entwickeln und zu validieren (vgl. Abschnitt 4.2). Ex-post können zudem mehrere Perspektiven und

Feedbackquellen integriert werden, um ein umfassendes Bild der Validität des Bewertungsverfahrens zu erhalten. Darüber hinaus können in der ex-post Phase informelle Validierungsmethoden besonders als Ergänzung zu anderen Validierungsmethoden genutzt werden. Sie dienen dazu, spezifische Fragen zu beantworten oder die Evaluierungsergebnisse zu interpretieren (vgl. Abschnitt 4.2). Hier stellen die Bewertung durch Expertenmeinungen, Anwender des Bewertungsverfahrens, die Überprüfung anhand der Dokumente sowie Audits geeignete Validierungsmethoden dar.

Prädiktive Validierungsmethoden sind auf die ex-ante Validierung ausgerichtet (vgl. Abschnitt 4.2). Sie analysieren vergangene Daten, um Modelle zu generieren, die daraufhin verwendet werden können, um Prognosen über zukünftige Ereignisse zu erstellen. Anschließend werden die Vorhersagen des Bewertungsverfahrens mit den tatsächlich eingetretenen Ereignissen oder Ergebnissen verglichen (vgl. Abschnitt 4.2). Tabelle 20 stellt das erste Charakteristikum für den zu konzipierenden morphologischen Baukasten, basierend auf den Ausprägungen ex-ante und ex-post für den Zeitpunkt der Validierung dar.

Tabelle 20: Erstes Charakteristikum für den morphologischen Kasten

Charakteristika des Technologiebewertungsverfahrens	Ausprägungen für den morphologischen Kasten	
Zeitpunkt der Validierung	ex-ante	ex-post

Als zweites Charakteristikum wird die Zielsetzung eines Technologiebewertungsverfahrens in den Zusammenhang der Auswahl einer geeigneten Validierungsmethode gestellt. Es ist wichtig die Ziele eines Technologiebewertungsverfahrens zu berücksichtigen, da sie die Kriterien und Anforderungen festlegen, die bei der Auswahl einer geeigneten Validierungsmethode betrachtet werden müssen. Für das Konzept werden dahingehend die wesentlichen Ziele von Technologiebewertungsverfahren, die im Theorieteil erwähnt wurden, dargestellt und betrachtet (vgl. Abschnitt 2.3). Dem gegenüber stehen die spezifischen Ziele der Validierungsmethoden, die in Abschnitt 4.2 beschrieben wurden. Vor diesem Hintergrund wird die Eignung einer Validierungsmethode für die aufgelisteten Ziele eines Technologiebewertungsverfahrens betrachtet. Darüber hinaus werden sämtliche anderen Ziele unter Sonstige zusammengefasst und mögliche Beispiele dargestellt. Zusammenfassend aus den in Abschnitt 2.1 beschriebenen Zielen sowie den in Abschnitt 2.3 beschriebenen Kriterien ergeben sich somit folgende Ziele für Technologiebewertungsverfahren bei der Bewertung von Produktionstechnologien:

1. Wirtschaftlichkeitsbewertung
2. Potentialbewertung
3. Reifegradbewertung
4. Technische Machbarkeit
5. Ganzheitliche Bewertung

Ist das Ziel eines Technologiebewertungsverfahrens die Wirtschaftlichkeit einer Produktionstechnologie zu bewerten, können verschiedene Validierungsmethoden herangezogen werden. Eine quantitative Bewertung der Wirtschaftlichkeit einer Produktionstechnologie kann durch

die Analyse historischer Finanzdaten und die Prognose zukünftiger wirtschaftlicher Auswirkungen erreicht werden (vgl. Abschnitt 2.3). Datengetriebene Methoden ermöglichen die Analyse von großen Mengen an Wirtschaftsdaten, wie Umsatzdaten, Kostenstrukturen, Markttrends und Finanzindikatoren. Durch die Auswertung dieser Daten können datengetriebene Validierungsmethoden dazu beitragen, die Genauigkeit und Zuverlässigkeit hinsichtlich der Wirtschaftlichkeitsbewertung des Technologiebewertungsverfahrens zu untersuchen. Dies ermöglicht eine robuste Validierung der Wirtschaftlichkeitsaussagen und Bewertungsmethoden für die Produktionstechnologie. Messvalidierung kann verwendet werden, um die Genauigkeit von Messungen finanzieller Kennzahlen oder Leistungsindikatoren zu überprüfen, die für die Wirtschaftlichkeitsbewertung relevant sind. Mithilfe der Methoden der Validierung anhand variabler Parameter und Sensitivitätsanalyse können die Auswirkungen von Änderungen in spezifizierten Variablen oder Parametern auf wirtschaftliche Modelle oder Prognosen untersucht werden. Statistische Techniken können zur Analyse von Evaluierungsergebnissen oder zur Modellierung wirtschaftlicher Zusammenhänge verwendet werden (vgl. Abschnitt 4.2). Durch die Anwendung von Zeitreihenanalysen, Regressionsmodellen oder anderen statistischen Techniken können potentielle Rentabilitätsszenarien modelliert werden und die Entscheidungen basierend auf diesen Vorhersagen optimieren (Mayer und Butler 1993).

Demnach sind datengetriebene Validierungsmethoden geeignete Optionen, um das Technologiebewertungsverfahren zu validieren, wenn das Ziel eine Wirtschaftlichkeitsbewertung darstellt. Ein Praxisbeispiel könnte die Bewertung der Wirtschaftlichkeit einer neuen automatisierten Produktionslinie darstellen, die die Herstellungskosten senken und die Effizienz steigern soll. Die datengetriebene Validierungsmethode verdeutlicht beispielsweise anhand historischer Daten und Verfahrensvorhersagen, dass die Implementierung einer neuen automatisierten Produktionslinie eine erhebliche Reduzierung der Herstellungskosten und eine Steigerung der Gesamteffizienz zur Folge hätte. Nach der Durchführung und Überprüfung bestätigen die realen Ergebnisse die Prognosen der Validierungsmethode. Daraus lässt sich schließen, dass die Wirtschaftlichkeit der Produktionslinie mit hoher Wahrscheinlichkeit erfolgreich bewertet wurde. In diesem Beispiel wurden die datengetriebenen Validierungsmethoden mit einer prädiktiven Validierungsmethode kombiniert. Prädiktive Validierungsmethoden können die Ergebnisse des Technologiebewertungsverfahrens hinsichtlich prognostizierter zukünftiger Wirtschaftlichkeitssteigerungen mit überprüfen und sind somit geeignet (vgl. Abschnitt 4.2).

Analog hierzu ermöglichen interne Validierungsmethoden eine Bewertung der Effizienz des Technologiebewertungsverfahrens durch interne Tests oder Simulationen von Produktionsabläufen (vgl. Abschnitt 4.2). Durch die Durchführung interner Tests kann die Leistung des Verfahrens unter verschiedenen Bedingungen überprüft und Daten gesammelt werden, um somit Rückschlüsse auf die Eignung des Technologiebewertungsverfahrens für die Wirtschaftlichkeitsbewertung zu ziehen.

Ein Einsatz von externen Validierungsmethoden ermöglicht es, potentielle Stärken und Schwächen eines Technologiebewertungsverfahrens für die Wirtschaftlichkeitsbewertungen zu identifizieren. Im Rahmen einer Kreuzmodellvalidierung kann dies bedeuten, dass verschiedene Verfahren zur Schätzung von beispielsweise Kapitalwerten, Betriebskosten oder anderen

finanziellen Metriken auf denselben Datensatz angewendet werden, um zu sehen, ob sie vergleichbare Ergebnisse liefern (vgl. Abschnitt 4.2). Empirische Validierung kann verwendet werden, um die Ergebnisse einer Wirtschaftlichkeitsbewertung mit den tatsächlichen finanziellen Ergebnissen zu vergleichen, die nach der Implementierung der Technologie erzielt wurden. Auf diese Weise kann überprüft werden wie angemessen das Bewertungsverfahren die tatsächliche wirtschaftliche Leistung der Technologie bewertet.

Informelle Methoden können angewendet werden, um in einem Expertenkreis über die Eignung des Technologiebewertungsverfahrens hinsichtlich der Bewertung der Wirtschaftlichkeit einer Technologie zu diskutieren. Die Meinungen von Experten können herangezogen werden, um beispielsweise die Relevanz der Bewertungskriterien für die Wirtschaftlichkeitsbewertung zu beurteilen.

Die Identifikation potentieller Technologien als Ziel eines Technologiebewertungsverfahrens kann durch datengetriebene, externe, prädiktive und informelle Methoden validiert werden. Als Hauptkriterium ist hierbei zu untersuchen, inwiefern Validierungsmethoden die Voraussagegenauigkeit von Technologiebewertungsverfahren bewerten können, die bei der Potentialbewertungen von besonderer Bedeutung ist (vgl. Abschnitt 2.3). Datengetriebene Methoden analysieren Marktdaten und identifizieren Trends und Entwicklungen, die im Zusammenhang mit dem Technologiebewertungsverfahren erzielt wurden, um dahingehend die Voraussagegenauigkeit des Verfahrens zu bewerten (vgl. Abschnitt 4.2). Vergleichbar zu der Wirtschaftlichkeitsbewertung können statistische Techniken eingesetzt werden, um Prognosemodelle für das Bewertungsverfahren zu erstellen. Ein Praxisbeispiel könnte die Bewertung des Potentials einer neuen Maschine in einer Fertigungsanlage sein. Durch die Analyse historischer Produktionsdaten und Marktbedingungen kann die datengetriebene Validierung für ein Technologiebewertungsverfahren aufzeigen, ob sich der ermittelte Einfluss der Maschine auf die Produktivität und Effizienz der Fertigungsprozesse bestätigt hat.

Externe Validierungsmethoden bewerten durch den Vergleich von externen Datenquellen oder unabhängigen Studien die Vorhersagen eines Technologiebewertungsverfahrens in Bezug auf das Potential einer Technologie (vgl. Abschnitt 4.2). Dadurch kann die Gültigkeit und Übertragbarkeit in Bezug auf die Vorhersagegenauigkeit des Technologiebewertungsverfahrens validiert werden. Ein Beispiel wäre die Validierung des Potentials einer neuen Produktionsmethode, welche durch den Vergleich mit ähnlichen Technologiebewertungen der Produktionsmethode in der Branche oder durch die Analyse von empirischen Daten erreicht werden kann.

Prädiktive Validierungsmethoden prognostizieren das Potential einer Technologie unter verschiedenen Szenarien und zukünftigen Bedingungen, um die Annahmen und Hypothesen des Verfahrens zu bewerten (vgl. Abschnitt 4.2). Da sich Potentialbewertungen von Technologien auf die Zukunft beziehen, sind prädiktive Validierungsmethoden besonders geeignet, um die Vorhersagegenauigkeit des Bewertungsverfahrens zu betrachten (vgl. Abschnitt 2.3). Hierbei stellt die Verwendung von Modellen ein Beispiel dar, um das Potential einer neuen Produktionstechnologie bei unterschiedlichen Produktionsvolumina oder Marktnachfragen vorherzusagen und die Validität des Technologiebewertungsverfahrens zu bewerten.

Informelle Methoden können angewendet werden, um in einem Expertenkreis über die Eignung des Technologiebewertungsverfahrens hinsichtlich der Bewertung des Potentials einer Technologie zu diskutieren. Aufgrund der Ungenauigkeit und Unsicherheit bei der Anwendung sind die anderen Validierungsmethoden zu bevorzugen (vgl. Abschnitt 4.2). Interne Validierungsmethoden sind aufgrund ihrer Orientierung an internen Daten eher weniger relevant. Diese nutzen interne Ressourcen und Daten, was dazu führen kann, dass eine eingeschränkte Perspektive auf die Bewertung der Potentiale der vorhandenen Produktionstechnologien vorherrscht (vgl. Abschnitt 4.2). Externe Einflüsse können möglicherweise nicht angemessen berücksichtigt werden, die für die Potentialbewertung von Bedeutung sind.

Datengetriebene Validierungsmethoden sind eine geeignete Wahl bei einer Reifegradbewertung, um die Validität eines Technologiebewertungsverfahrens zu bewerten. Durch die Analyse historischer Entwicklungsdaten einer Produktionstechnologie können Muster identifiziert und Trends aufgezeigt werden, die auf den Reifegrad einer Technologie hinweisen (vgl. Abschnitt 4.2). Durch die Untersuchung dieser Daten können wichtige Einblicke in den Reifegrad der Produktionstechnologie gewonnen und das Technologiebewertungsverfahren validiert werden. Dadurch wird beispielsweise ermöglicht, objektive Maßstäbe für den Reifegrad zu bewerten (vgl. Abschnitt 4.2).

Externe Validierungsmethoden sind nützlich bei der Überprüfung der externen Validität des Technologiebewertungsverfahrens, indem sie die Bewertungen des Reifegrads mit externen Quellen oder Expertenmeinungen abgleichen (vgl. Abschnitt 4.2). Durch den Vergleich mit anderen unabhängigen Reifegradbewertungen durch Kreuzmodellvalidierung oder Industriestandards mithilfe der empirischen Validierung lässt sich die Zuverlässigkeit und Genauigkeit des Verfahrens überprüfen (vgl. Abschnitt 4.2).

Informelle Validierungsmethoden können als ergänzende Instrumente genutzt werden, um qualitative Einschätzungen und Expertenmeinungen zum Reifegrad von Technologien zu bewerten. Mithilfe von Audits und dem Feedback von Stakeholdern oder Branchenexperten können zusätzliche Einblicke gewonnen werden, die zur Verbesserung des Verfahrens zur Bewertung des Reifegrads beitragen können (vgl. Abschnitt 4.2). Beispielsweise können die Evaluierungsergebnisse zum Reifegrad einer Produktionstechnologie mit den Einschätzungen der Experten verglichen werden, um Rückschlüsse für die Bewertung des Reifegrads zu erhalten.

Prädiktive und interne Validierungsmethoden eignen sich bei der Reifegradbewertung weniger zur Validierung eines Technologiebewertungsverfahrens. Dies ist dadurch bedingt, dass prädiktive und interne Validierungsmethoden Schwierigkeiten haben können, objektive Vergleichsmaßstäbe oder Referenzpunkte zu bieten, die für eine Reifegradbewertung notwendig sind (vgl. Abschnitt 4.2). Bei der Reifegradbewertung ist es wichtig, den aktuellen Stand der Technologie mit branchenüblichen Standards, Benchmarks oder Best Practices zu vergleichen (vgl. Abschnitt 2.3). Interne und prädiktive Validierungsmethoden liefern möglicherweise nicht ausreichend solcher Vergleichsmöglichkeiten. Prädiktive Validierungsmethoden zielen darauf ab zukünftige Leistungen oder Entwicklungen vorherzusagen (vgl. Abschnitt 4.2). Bei einer Reifegradbewertung geht es allerdings darum, den aktuellen Stand und die Fortschritte einer Technologie zu bewerten (vgl. Abschnitt 2.3). Eine beispielhafte Möglichkeit wie prädiktive

Validierungsmethoden genutzt werden können, wäre die zukünftigen Entwicklungen und Trends im Reifegrad von Technologien vorherzusagen und die Vorhersagegenauigkeit des Bewertungsverfahrens dahingehend zu überprüfen (vgl. Abschnitt 4.2). Durch Modellierung und Prognostizierung verschiedener Szenarien und Entwicklungspfade kann die Leistungsfähigkeit des Verfahrens getestet werden, den zukünftigen Reifegrad von Technologien vorherzusagen.

Für die Validierung eines Technologiebewertungsverfahrens, dessen Ziel die Bewertung der technischen Machbarkeit einer Produktionstechnologie ist, wäre eine interne Validierungsmethode eine geeignete Wahl. Intern validierte Technologiebewertungsverfahren haben den Vorteil, dass sie anhand interner Daten oder Studien getestet werden (vgl. Abschnitt 4.2). Durch interne Tests mit datengetriebenen Validierungsmethoden kann die Funktionsfähigkeit des Verfahrens unter verschiedenen Szenarien geprüft werden. Dies führt zu einem besseren Verständnis seiner Eignung für die Bewertung der technischen Machbarkeit. Mittels interner Validierungsmethoden lässt sich der Validierungsprozess vollständig kontrollieren und an spezifische Anforderungen anpassen (vgl. Abschnitt 4.2). Dies ermöglicht es, Tests und Experimente durchzuführen, die auf die technischen Aspekte der Technologie zugeschnitten sind und eine gründliche Bewertung ihrer Machbarkeit ermöglichen. Zudem können interne Ressourcen genutzt werden, um die Leistungsfähigkeit und Funktionsweise der Technologie unter realen Bedingungen zu testen.

Bei den informellen Validierungsmethoden stellen insbesondere das Wissen von Experten, die Bewertung durch Anwender, die sich mit der Produktionstechnologie beschäftigen sowie die Überprüfung der Dokumente, geeignete Methoden dar. Dies ist abhängig von der Erfahrung der Mitarbeiter, die für die Validierung des Technologiebewertungsverfahrens herangezogen werden können. Ein Beispiel hierfür wäre die Validierung der Ausrichtung der Parameter für die Bewertung der technischen Machbarkeit (vgl. Abschnitt 4.2). Die Überprüfung der Dokumente ist für die Nachvollziehbarkeit über die Erstellung des Technologiebewertungsverfahrens in Bezug auf die technische Machbarkeit von Bedeutung, um daran das Verfahren zu validieren.

Bei der Überprüfung der technischen Machbarkeit wird die aktuelle Leistungsfähigkeit und Funktionalität der Produktionstechnologie bewertet (vgl. Abschnitt 2.3). Prädiktive Validierungsmethoden eignen sich somit aufgrund ihrer Orientierung, zukünftige Entwicklungen oder Ereignisse vorherzusagen, nicht. Im Kontext der Überprüfung der technischen Machbarkeit einer Produktionstechnologie anhand externer Validierungsmethoden können relevante externe Daten möglicherweise nicht verfügbar oder nicht vergleichbar sein (vgl. Abschnitt 4.2). Darüber hinaus bieten beide Methodengruppen begrenzte Einblicke in die internen Funktionalitäten und Prozesse (vgl. Abschnitt 4.2). Dies kann dazu führen, dass wichtige Aspekte der technischen Machbarkeit übersehen oder nicht angemessen berücksichtigt werden.

Ist das Ziel des Technologiebewertungsverfahrens eine ganzheitliche Bewertung der Produktionstechnologie, kann dies insbesondere durch informelle Validierungsmethoden erfolgen. Informelle Validierungsmethoden ermöglichen eine flexible und anpassungsfähige Validierung des Bewertungsverfahrens, da sie weniger formalisiert und strukturiert sind (vgl. Abschnitt 4.2).

Ein weiterer Grund ist, dass Expertenmeinungen und qualitatives Feedback dazu beitragen, verschiedene Aspekte des Bewertungsverfahrens zu bewerten und Empfehlungen für zukünftige Verbesserungen zu erfassen (vgl. Abschnitt 4.2). Eine weitere Validierungsmethode wäre die Anwendung des Technologiebewertungsverfahrens (Experimentelle Validierung) an einem Technologiebeispiel, um daraus Rückschlüsse zu ziehen (vgl. Abschnitt 4.2). Der Ausschluss anderer Validierungsmethoden basiert auf Aspekten wie die begrenzte Vorhersagegenauigkeit für zukünftige Entwicklungen, eine begrenzte Berücksichtigung der qualitativen Aspekte und der Mangel an ganzheitlichen Bewertungsmaßstäben zum Vergleich (vgl. Abschnitt 4.2). Datengetriebene und prädiktive Methoden basieren häufig auf statistischen Modellen oder Algorithmen, die möglicherweise nicht flexibel genug sind, um den spezifischen Kontext und die individuellen Anforderungen einer ganzheitlichen Bewertung der Produktionstechnologie angemessen zu berücksichtigen (vgl. Abschnitt 4.2). In diesem Kontext ist eine Kombination verschiedener Validierungsmethoden sinnvoll, indem die ganzheitliche Bewertung in Teilaspekte unterteilt wird und die Teilziele einzeln validiert werden. Dadurch kann eine umfassendere und zuverlässigere Validierung erfolgen. Die Ergebnisse sind zusammenfassend in Tabelle 21 dargestellt.

Tabelle 21: Eignung der Validierungsmethoden für verschiedene Bewertungsziele

Gruppen	Ziel	Wirtschaftlichkeit	Potential	Reifegrad	Technische Machbarkeit	Ganzheitlich
Datengetrieben		ja	ja	ja	ja	eher weniger
Intern		ja	nein	nein	ja	eher weniger
Extern		ja	ja	ja	eher weniger	ja
Informell		ja	ja	ja	eher weniger	ja
Prädiktiv		ja	ja	eher weniger	nein	nein

Tabelle 21 zeigt die Eignung der Validierungsmethoden für verschiedene Bewertungsziele von Technologiebewertungsverfahren. Als Ausprägungen wurden ja, eher weniger und nein gewählt. Die Ausprägung eher weniger bezieht sich auf die Tatsache, dass eine Anwendung der Validierungsmethode möglich ist, allerdings Einschränkungen existieren und andere Validierungsmethoden zu bevorzugen sind.

Die Zusammenführung basierte auf Einschätzungen bezüglich geeigneter Validierungsmethoden für die beschriebenen Eigenschaften der Bewertungsziele sowie deren Anwendbarkeit in unterschiedlichen Kontexten. Hierbei ist zu erwähnen, dass die Spezifizierung auf eine Validierungsmethode anhand der Zielsetzung eines Technologiebewertungsverfahrens erschwert und eine Kombination verschiedener Validierungsmethoden in der Praxis empfehlenswert ist. Zielführend ist insbesondere die ständige Kombination mit informellen Validierungsmethoden,

um eine erhöhte Glaubwürdigkeit und Sicherheit bei der Betrachtung der Zielsetzung im Zusammenhang mit der Validierung des Technologiebewertungsverfahrens zu erzielen (vgl. Abschnitt 4.2). Generell ist die subjektive Einschätzung durch Experten oder Fachkräfte in jeder Situation hilfreich und anwendbar. Allerdings ist die Sicherheit der Validierung geringer im Vergleich zu den anderen Validierungsmethoden (vgl. Abschnitt 4.2). Tabelle 22 zeigt das zweite Charakteristikum mit den Zielen von Technologiebewertungsverfahren als Ausprägung für den morphologischen Kasten.

Tabelle 22: Zweites Charakteristikum für den morphologischen Kasten

Zielsetzung	Wirtschaftlich	Potential	Reifegrad	Technische Machbarkeit	Ganzheitlich
-------------	----------------	-----------	-----------	------------------------	--------------

In Abschnitt 2.3 wurde auf verschiedene Kriterien bei der Bewertung von Produktionstechnologien eingegangen. Die Bewertungskriterien unterscheiden sich hinsichtlich der Zielstellung des Technologiebewertungsverfahrens. Beispielsweise sind für die Wirtschaftlichkeitsbewertung andere Kriterien heranzuziehen als für eine Potentialbewertung oder Reifegradbewertung (vgl. Abschnitt 2.3). Die Bewertungskriterien lassen sich anhand verschiedener Merkmale klassifizieren (vgl. Tab. 1). Schon bei der Zielsetzung von Technologiebewertungsverfahren wurde auf die verschiedenen Kriterien eingegangen, die das Ziel widerspiegeln. Ist das Ziel eines Technologiebewertungsverfahrens beispielsweise die Bewertung der technischen Machbarkeit, ist das Kriterium Technische Machbarkeit zu untersuchen und zu bewerten (vgl. Abb. 12). Die Auswahl geeigneter Bewertungskriterien erfolgt kontextbasiert, d. h. durch die verschiedenen Organisationsbereiche sowie in den Phasen des Technologiemanagement-Prozesses (vgl. Abschnitt 2.3). Die Nutzung von Bewertungskriterien kann sich je nach gewähltem Ansatz zur Technologiebewertung stark unterscheiden, weshalb im Folgenden auf die Klassifizierung der Bewertungskriterien genauer eingegangen wird. Anhand einer übergeordneten Klassifizierung der Bewertungskriterien wird der Zusammenhang zur Auswahl einer geeigneten Validierungsmethode hergestellt.

Die beschriebene Klassifizierung basiert auf der Unterscheidung der Bewertungskriterien hinsichtlich ihrer Erfassbar- und Vorhersagbarkeit (vgl. Tab. 1). Bei der Erfassbarkeit wird zwischen qualitativen und quantitativen Kriterien unterschieden. Auf der einen Seite bezieht sich dies auf Kriterien, die auf subjektiven Einschätzungen beruhen und beispielsweise mit niedrig bis hoch bewertet werden. Auf der anderen Seite stehen Kriterien, die messbare Größen darstellen und aggregiert werden können (vgl. Abschnitt 2.3). Wenn das Technologiebewertungsverfahren ausschließlich aus qualitativen Bewertungskriterien besteht, eignen sich Validierungsmethoden besser als andere. Datengetriebene Validierungsmethoden basieren auf der Analyse von quantitativen Daten und sind daher weniger geeignet, wenn die Bewertungskriterien rein qualitativ sind (vgl. Abschnitt 4.2). Dennoch können sie dazu dienen, qualitative Analysen und andere Validierungsmethoden zu ergänzen (vgl. Abschnitt 4.2).

Interne Validierungsmethoden wie strukturelle Validierung und Konstrukt Validierung eignen sich nur für quantitative Bewertungskriterien, können allerdings nützlich sein. Strukturelle Validierung und Konstrukt Validierung erfordern die klare Definition von Konstrukten oder Merkmalen, die gemessen werden sollen (vgl. Abschnitt 4.2). Selbst wenn die Bewertungskriterien

qualitativ sind, können diese in klar definierte Konstrukte umgewandelt werden, die validiert werden können. Dadurch wird die Zuverlässigkeit der Annahmen und Strukturen der relevanten Aspekte der zu bewertenden Produktionstechnologie eines Technologiebewertungsverfahrens erhöht (vgl. Abschnitt 4.2). Interne Validierungsmethoden, die auf datenbasierten Validierungsmethoden basieren, sind weniger geeignet für die Validierung von qualitativen Bewertungskriterien (vgl. Abschnitt 4.2).

Externe Validierungsmethoden, wie Kreuzmodellvalidierung und empirische Validierung dienen dazu, die Übertragbarkeit und Allgemeingültigkeit eines Bewertungsverfahrens zu überprüfen. Obwohl die Methoden auf quantitativen Daten basieren und diese mit dem eigenen Technologiebewertungsverfahren vergleichen, können darüber hinaus qualitative Bewertungskriterien durch den Vergleich mit externen Standards, Verfahren oder Expertenmeinungen validiert werden (vgl. Abschnitt 4.2)

Informelle Validierungsmethoden wie Expertenmeinungen, Benutzerbewertungen, Audit und (Peer-)Reviews sind besonders geeignet, wenn die Bewertungskriterien qualitativ sind (vgl. Abschnitt 4.2). Dies liegt an der Tatsache, dass keine quantitativen Daten notwendig sind für die Validierung eines Technologiebewertungsverfahrens und die Validierung weniger strukturiert und formal ist (vgl. Abschnitt 4.2). Informelle Validierungsmethoden können qualitative Datenanalyse-Techniken wie Interviews, Fokusgruppen oder Fallstudien einsetzen, um die Validierung der qualitativen Bewertungskriterien zu überprüfen (vgl. Abschnitt 4.2).

Prädiktive Validierungsmethoden können beispielsweise zur Bewertung von Hypothesen und Annahmen verwendet werden, die qualitative Aspekte betreffen (vgl. Abschnitt 4.2). Sie können helfen, Vorhersagen über zukünftige Entwicklungen oder Auswirkungen der zu bewertenden Technologien zu validieren, indem sie qualitative Belege oder Indikatoren berücksichtigen (vgl. Abschnitt 4.2) Hervorzuheben ist hier die qualitative prädiktive Validierung, die sich aufgrund ihrer Orientierung an qualitativen Kriterien besonders eignet (vgl. Abschnitt 4.2).

Besteht das Technologiebewertungsverfahren ausschließlich aus quantitativen Bewertungskriterien, sind Validierungsmethoden basierend auf Daten von größerer Bedeutung (vgl. Abschnitt 4.2). Dadurch können komplexe Zusammenhänge zwischen verschiedenen quantitativen Variablen identifiziert und analysiert werden (vgl. Abschnitt 4.2). Im Gegensatz zu Technologiebewertungsverfahren mit ausschließlich qualitativen Bewertungskriterien, sind informelle Methoden im Vergleich zu den anderen Validierungsmethoden weniger aussagekräftig hinsichtlich der Validität (vgl. Abschnitt 4.2). Die Methoden bieten zwar qualitative Einsichten und Feedback, eine hohe Sicherheit bezüglich der Validität kann aufgrund der subjektiven Einschätzung allerdings nicht garantiert werden.

Datengetriebene Validierungsmethoden sind für die Validierung von Technologiebewertungsverfahren mit ausschließlich quantitativen Bewertungskriterien besonders geeignet (vgl. Abschnitt 4.2). Mittels der Analyse umfangreicher Datenmengen und der Anwendung statistischer Verfahren kann eine präzise und zuverlässige Validierung mit hoher Sicherheit gewährleistet werden (vgl. Abschnitt 4.2). Interne, prädiktive und externe Validierungsmethoden eignen sich, da sie analog den datengetriebenen Validierungsmethoden auf der Analyse von Daten

basieren (vgl. Abschnitt 4.2). Ein wesentlicher Vorteil dieser Methoden liegt darin, dass sie im Vergleich zu informellen Validierungsmethoden eine objektive Herangehensweise aufweisen, wodurch ihre Anwendung bei quantitativen Bewertungskriterien erleichtert wird (vgl. Abschnitt 4.2).

Neben der isolierten Betrachtung von qualitativen und quantitativen Kriterien können Technologiebewertungsverfahren zudem eine Kombination beider Kriterien, eine hybride Variante, besitzen (vgl. Abschnitt 2.3). In diesem Fall sind geeignete Kombinationen der Validierungsmethoden zu untersuchen. Hervorzuheben ist hierbei die Kombination von datengetriebenen, internen, externen oder prädiktiven Methoden mit informellen Methoden. Eine Kombination mit informelle Validierungsmethoden wie beispielsweise Expertenmeinungen und Nutzerbewertungen kann dazu beitragen, die Interpretation der quantitativen Bewertungskriterien zu verbessern und die qualitativen Kriterien zu validieren (vgl. Abschnitt 4.2). Validierungsmethoden wie Audit und (Peer-) Review können verwendet werden, um das Bewertungsverfahren von Fachleuten oder Experten überprüfen zu lassen und Feedback zur Verbesserung zu erhalten, wenn interne Validierungsmethoden zum Einsatz kommen. In Bezug zu externen Validierungsmethoden kann die Relevanz und Gültigkeit der externen Quellen oder Studien anhand von Expertenmeinungen oder Reviews bewertet werden. Bei prädiktiven Validierungsmethoden kann die Expertenmeinung dazu beitragen, die Plausibilität und Relevanz der Vorhersagen zu bewerten und gegebenenfalls anzupassen. Diese Beispiele zeigen, dass eine Kombination der Validierungsmethoden insbesondere bei hybriden und quantitativen Bewertungskriterien in Technologiebewertungsverfahren sinnvoll sein können, um die Zuverlässigkeit der Validierung zu erhöhen. Im Rahmen des Konzepts gilt es die Bewertungskriterien und -parameter des Technologiebewertungsverfahrens zu untersuchen. Für das Charakteristika der Erfassbarkeit der Bewertungskriterien für den zu konzipierenden morphologischen Baukasten sind somit die Ausprägungen qualitativ, quantitativ und hybrid zu bewerten (vgl. Tab. 23).

Tabelle 23: Drittes Charakteristikum für den morphologischen Kasten

Bewertungskriterien und -parameter	qualitativ	quantitativ	hybrid
------------------------------------	------------	-------------	--------

Neben der Erfassbarkeit der Bewertungskriterien ist die Vorhersagbarkeit der Bewertungskriterien ein Faktor, der die Auswahl einer geeigneten Validierungsmethode mit beeinflusst. Hierbei wird zwischen sicheren und unsicheren Bewertungskriterien unterschieden (vgl. Tab. 1). Sichere Bewertungskriterien beziehen sich auf Kriterien oder Maßstäbe, die sich durch Objektivität, Relevanz, Messbarkeit, Zuverlässigkeit, Validität, Robustheit und Überprüfbarkeit auszeichnen. Dagegen weisen unsichere Bewertungskriterien in einem oder mehreren dieser Aspekte Schwächen auf (vgl. Abschnitt 2.3). Die Bewertung einer Technologie ist in spezifizierten Situationen, beispielsweise bei der Technologiefrüherkennung, mit einer hohen Unsicherheit verbunden (vgl. Abschnitt 2.2). Um mit Unsicherheit in Technologiebewertungsverfahren umzugehen, sind detaillierte Bewertungsprozesse als Entscheidungsunterstützung notwendig, um die Unsicherheit zu minimieren (vgl. Abschnitt 2.2). Der Umgang mit Unsicherheit eröffnet die Möglichkeit, robustere und realistischere Entscheidungen zu treffen (vgl. Abschnitt 2.3).

Validierungsmethoden sollten bei Unsicherheit im Technologiebewertungsverfahren mit dieser umgehen können, um die Glaubwürdigkeit des Verfahrens angemessen zu überprüfen (vgl. Abschnitt 3.2). Je nachdem wie stark Unsicherheiten im Verfahren berücksichtigt werden müssen, kann die Wahl der Validierungsmethode variieren (vgl. Abschnitt 4.2). Beispiele für solche Unsicherheiten stellen Unsicherheiten in den Daten oder externe Einflüsse durch Marktunsicherheiten dar (vgl. Abschnitt 3.2). Marktunsicherheit kann sich beispielsweise in der Ungewissheit über die zukünftige Marktentwicklung für eine Technologie zeigen. Vor diesem Hintergrund wird im Folgenden untersucht, inwiefern Unsicherheiten in einem Technologiebewertungsverfahren die Auswahl einer geeigneten Validierungsmethode beeinflussen. Informelle Validierungsmethoden sind aufgrund ihrer mangelnden Objektivität, fehlenden Struktur und begrenzten Robustheit eher weniger für die Validierung von Technologiebewertungsverfahren mit Unsicherheiten geeignet (vgl. Abschnitt 4.2). Die Subjektivität der Methoden ermöglicht es allerdings, subtile Unsicherheiten zu identifizieren, die möglicherweise nicht quantifizierbar sind und dennoch wichtige Auswirkungen auf den Bewertungsprozess haben können (vgl. Abschnitt 4.2). Durch die informellen Diskussionen können potentielle Risiken und Unsicherheiten aufgedeckt werden, die möglicherweise in anderen Validierungsmethoden übersehen werden würden. Für die folgenden Unsicherheiten werden die Methoden nicht näher betrachtet.

In Unterabschnitt 3.1.2 wurde auf die Validität von Daten eingegangen. Datenvalidität bezieht sich auf die Genauigkeit, Zuverlässigkeit und Relevanz von Daten in Bezug auf den beabsichtigten Verwendungszweck (vgl. Unterabschnitt 3.1.2). Oftmals sind Technologiebewertungsverfahren mit Unsicherheiten in den Daten konfrontiert und es können keine validen Daten, die für die Bewertung herangezogen werden, gewährleistet werden (vgl. Abschnitt 2.2). Wenn ein Technologiebewertungsverfahren maßgeblich auf empirischen Daten basiert und die Unsicherheit in diesen Daten berücksichtigt werden muss, kann eine datengetriebene Validierungsmethode angemessen sein (vgl. Abschnitt 4.2). Durch die Analyse großer Datensätze lässt sich die Varianz und Zuverlässigkeit der Ergebnisse bewerten (vgl. Abschnitt 4.2). Die Sensitivitätsanalyse bewertet die Auswirkungen von Unsicherheiten in den Eingangsdaten oder Parametern auf die Evaluierungsergebnisse des Technologiebewertungsverfahrens (vgl. Abschnitt 4.2). Dadurch ist die Methode geeignet die Auswirkungen von Unsicherheiten auf das Technologiebewertungsverfahren zu verstehen und das Verfahren angemessen zu validieren. Darüber hinaus eignen sich statistische Techniken, um die Stabilität der Ergebnisse angesichts von Schwankungen oder Ungenauigkeiten in den Daten zu überprüfen (vgl. Abschnitt 4.2). Beispielsweise kann durch die Verwendung von Wahrscheinlichkeitsverteilungen und probabilistischen Modellen statistische Techniken dazu beitragen, die Bandbreite der möglichen Ergebnisse und die Wahrscheinlichkeit verschiedener Szenarien zu bewerten (vgl. Abschnitt 4.2). Interne Validierungsmethoden sind geeignet, indem sie die interne Konsistenz und Stabilität des Verfahrens überprüfen (vgl. Abschnitt 4.2). Dies ermöglicht die Identifizierung und Bewertung von Unsicherheiten in den internen Daten, indem Sensitivitätsanalysen und statistische Techniken angewendet werden (vgl. Abschnitt 4.2).

Externe Validierungsmethoden bieten eine unabhängige Überprüfung des Bewertungsverfahrens, indem externe Quellen berücksichtigt werden (vgl. Abschnitt 4.2). Dadurch kann die Robustheit des Bewertungsverfahrens gegenüber Unsicherheiten in den Daten validiert werden,

indem die Eingangsdaten beispielsweise bei anderen Technologiebewertungsverfahren angewendet werden. Prädiktive Validierungsmethoden ermöglichen es, Unsicherheiten in den Eingangsdaten zu modellieren und zu quantifizieren (vgl. Abschnitt 4.2). Durch die Verwendung von probabilistischen Modellen können verschiedene Szenarien und ihre jeweiligen Wahrscheinlichkeiten berücksichtigt werden, um Unsicherheiten in den Daten explizit zu berücksichtigen (vgl. Abschnitt 4.2).

Technologiebewertungsverfahren sind oftmals auf unsicheren internen Annahmen aufgebaut, beispielsweise über die technische Leistungsfähigkeit einer Produktionstechnologie (vgl. Abschnitt 2.3). Unsichere interne Annahmen können die Qualität und Zuverlässigkeit der Bewertung einer Technologie beeinträchtigen und die Entscheidungsfindung erschweren (vgl. Abschnitt 2.3). Datengetriebene Validierungsmethoden stellen geeignete Methoden dar, um anhand der Nutzung historischer Daten die Validität interner Annahmen zu überprüfen und potentielle Unsicherheiten zu identifizieren (vgl. Abschnitt 4.2). Unter Anwendung von Sensitivitätsanalysen und statistischen Verfahren ermöglicht dies die Identifizierung und Bewertung von Unsicherheiten in den internen Annahmen (vgl. Abschnitt 4.2). Darüber hinaus können interne Validierungsmethoden angewendet werden, da sie speziell auf die interne Konsistenz und Stabilität ausgerichtet sind (vgl. Abschnitt 4.2). Externe Validierungsmethoden bieten eine unabhängige Perspektive durch externe Experten, um die internen Annahmen zu bewerten. Dadurch kann sichergestellt, dass sie den externen Realitäten entsprechen (vgl. Abschnitt 4.2). Prädiktive Validierungsmethoden können zudem verwendet werden, um die prognostizierten Auswirkungen interner Annahmen auf zukünftige Ergebnisse zu ermitteln und die Robustheit der Bewertung zu überprüfen (vgl. Abschnitt 4.2).

Externe Unsicherheiten im Kontext eines Technologiebewertungsverfahrens beziehen sich auf Faktoren oder Variablen, die außerhalb der unmittelbaren Kontrolle des Bewertungsprozesses liegen und dessen Ergebnisse beeinflussen können (vgl. Abschnitt 2.2). Ein Beispiel hierfür sind Schwankungen in der Marktnachfrage. Externe Validierungsmethoden können nützlich sein, um die Robustheit des Technologiebewertungsverfahrens gegenüber externen Unsicherheiten zu testen (vgl. Abschnitt 4.2). Durch den Vergleich mit externen Datenquellen oder äquivalenten Technologiebewertungsverfahren werden mögliche Unsicherheitsquellen im Prozess identifiziert und beurteilt (vgl. Abschnitt 4.2). In diesem Kontext wird eine zusätzliche Sicherheit der Validierung der Unsicherheit erreicht, indem sie unabhängige Bestätigungen der Technologiebewertung liefern. Hierbei eignen sich besonders die Kreuzmodellvalidierung und die empirische Validierung (vgl. Abschnitt 4.2). Anhand datengetriebener Validierungsmethoden können relevante Daten in Bezug auf externe Unsicherheiten analysiert werden. Diese Daten können verwendet werden, um externe Unsicherheiten wie beispielsweise Marktschwankungen zu quantifizieren und zu bewerten (vgl. Abschnitt 4.2). Interne Validierungsmethoden sind aufgrund ihrer Orientierung an internen Daten nicht geeignet (vgl. Abschnitt 4.2). Sie können die externen Einflüsse und Unsicherheiten nicht erfassen, die die Technologiebewertung beeinflussen. Dies liegt u. a. an der fehlenden externen Perspektive (vgl. Abschnitt 4.2). Prädiktive Validierungsmethoden sind geeignet für externe Unsicherheiten, da sie beispielsweise Unsicherheiten wie Marktentwicklungen anhand von Modellen prognostizieren und Maßnahmen zur Risikominderung entwickeln (vgl. Abschnitt 4.2).

Häufig gründen sich Technologiebewertungsverfahren auf der Vorhersage künftiger Entwicklungen, um beispielsweise das Potential einer Technologie zu evaluieren (vgl. Abschnitt 2.3). Wenn das Technologiebewertungsverfahren langfristige Prognosen treffen muss und mit Unsicherheiten in zukünftigen Entwicklungen konfrontiert ist, ist eine prädiktive Validierungsmethode geeignet (vgl. Abschnitt 4.2). Durch die Evaluation der Vorhersagefähigkeit unter verschiedenen Szenarien oder mittels Trendanalysen wird das Verfahren validiert, wodurch die Auswirkungen von Unsicherheiten auf die Resultate bewertet werden können (vgl. Abschnitt 4.2). Datengetriebene Validierungsmethoden sind darüber hinaus aufgrund der Analyse historischer Daten zur Identifizierung von Trends und zur Modellierung von Unsicherheiten in zukünftigen Entwicklungen geeignet. Statistische Techniken können hierbei verwendet werden, um Unsicherheit zu quantifizieren und Prognosen zu erstellen (vgl. Abschnitt 4.2). Interne Validierungsmethoden sind vergleichbar wie bei der externen Unsicherheit aufgrund ihrer begrenzten Perspektive und Orientierung an internen Daten nicht geeignet. Externe Validierungsmethoden sind nützlich, um verschiedene Perspektiven und Einsichten in die zukünftigen Entwicklungen zu integrieren und sicherzustellen, dass die Bewertung robust ist (vgl. Abschnitt 4.2). Tabelle 24 stellt zusammenfassend die Ergebnisse des Vergleiches der Unsicherheit in Technologiebewertungsverfahren mit der Eignung einer Validierungsmethode dar.

Tabelle 24: Eignung der Validierungsmethoden für verschiedene Unsicherheiten

Gruppen	Unsicherheit...	...in den (Eingangs-) Daten	...in den internen Annahmen	...durch externe Einflüsse	...in zukünftigen Entwicklungen	Keine Unsicherheiten
Datengetriebenen		ja	ja	ja	ja	ja
Intern		ja	eher weniger	nein	nein	ja
Extern		ja	eher weniger	ja	ja	ja
Informell		eher weniger	eher weniger	eher weniger	eher weniger	ja
Prädiktiv		ja	ja	ja	ja	ja

Als Ausprägungen wurden die vollständige Eignung mit ja bewertet, eher weniger für eine eingeschränkte Eignung und nein für keine Eignung gewählt. Tabelle 24 zeigt deutlich, dass datengetriebene und prädiktive Validierungsmethoden explizit für die Validierung von Technologiebewertungsverfahren mit Unsicherheiten geeignet sind. Informelle Validierungsmethoden sind eher weniger geeignet, allerdings aufgrund ihrer subjektiven Einschätzung universell anwendbar. Die Auswahl einer angemessenen Validierungsmethode hängt stark von der Art und dem Ausmaß der Unsicherheit im Technologiebewertungsverfahren ab. Eine gründliche Analyse der Unsicherheiten sowie der spezifischen Anforderungen des Bewertungsverfahrens ist von entscheidender Bedeutung, um sicherzustellen, dass die richtige Validierungsmethode ausgewählt wird. Für den zu konzipierenden morphologischen Baukasten ergeben sich die in Tabelle 25 dargestellten Unsicherheiten in einem Technologiebewertungsverfahren.

Tabelle 25: Viertes Charakteristikum für den morphologischen Kasten

Unsicherheit...	...in den Daten	...in den internen Annahmen	...durch externe Einflüsse	...in zukünftigen Entwicklungen	Keine Unsicherheiten
-----------------	-----------------	-----------------------------	----------------------------	---------------------------------	----------------------

Das fünfte Charakteristikum betrachtet die eingesetzten Bewertungsmethoden und ist vergleichbar zu dem Charakteristikum der Bewertungskriterien und -parameter. Das Charakteristikum basiert auf der Untersuchung, inwiefern die im Technologiebewertungsverfahren verwendeten Bewertungsmethoden qualitative oder quantitative Bewertungsmethoden darstellen (vgl. Abschnitt 2.2). In einem Szenario, in dem ein existierendes Bewertungsverfahren aus der Literatur verwendet wird, würde die erste Präferenz darauf liegen, eine externe Validierungsmethode zu wählen (vgl. Abschnitt 4.2). Hierbei wäre eine Kreuzmodellvalidierung oder eine empirische Validierung geeignet, um einen Vergleich mit existierenden Bewertungsverfahren aus der Literatur und Praxis zu ermöglichen (vgl. Abb. 6).

Dem gegenüber stehen eigenständig entwickelte Technologiebewertungsverfahren mit konstruierten Bewertungsmethoden, die validiert werden müssen. Analog der Bewertungskriterien und -parameter ist hierbei zu untersuchen, inwiefern die dargestellte Bewertungsmethode qualitative oder quantitative Ergebnisse erzielt. Ein Beispiel für eine qualitative Bewertungsmethode für ein Technologiebewertungsverfahren ist die Expertenbewertung oder -befragung (vgl. Abschnitt 2.2). Die Experten können anhand ihres Fachwissens und ihrer Erfahrung subjektive Bewertungen abgeben und qualitative Einschätzungen zu verschiedenen Aspekten der Technologie liefern (vgl. Abschnitt 2.2).

Datengetriebene Validierungsmethoden sind nicht geeignet für die Validierung von Technologiebewertungsverfahren, die auf qualitativen Bewertungen beruhen (vgl. Abschnitt 4.2). Ein Grund dafür ist, dass diese Methoden quantitative Daten erfordern und nicht anwendbar sind bei begrenzten oder nicht verfügbaren quantitativen Daten (vgl. Abschnitt 4.2). Datengetriebene Validierungsmethoden können zudem nicht angemessen auf subjektive Daten angewendet werden, da sie darauf abzielen, objektive Muster und Zusammenhänge in den Daten zu identifizieren (vgl. Abschnitt 4.2). Selbst bei Vorhandensein von quantitativen Daten sind die anspruchsvollen Analysetechniken, die mit datengetriebenen Validierungsmethoden verbunden sind, für qualitative Bewertungsmethoden überdimensioniert. Die Anwendung solcher Methoden auf qualitative Daten könnte zu ungenauen oder unzuverlässigen Ergebnissen führen (vgl. Abschnitt 4.2). Interne Validierungsmethoden können zudem weniger effektiv sein, da sie möglicherweise nicht alle Aspekte einer qualitativen Bewertung angemessen berücksichtigen (vgl. Abschnitt 4.2). Strukturelle Validierung und Konstrukt Validierung streben danach, objektive Muster und Zusammenhänge in den Daten zu identifizieren (vgl. Abschnitt 4.2). Für subjektive qualitative Daten ist dies möglicherweise nicht angemessen. Aus diesen Gründen sind interne Validierungsmethoden eher weniger geeignet.

Bei den externen Validierungsmethoden eignet sich der Vergleich der Struktur und Ergebnisse der Bewertungsmethode mit anderen Bewertungsmethoden, um die Validität zu überprüfen (vgl. Abschnitt 4.2). Experimentelle Validierung kann für qualitative Bewertungsmethoden überdimensioniert sein. Die Einschätzung resultiert aus den komplexen Analysetechniken, die

mit der Validierungsmethode verbunden sind (vgl. Abschnitt 4.2). Prädiktive Validierungsmethoden sind aufgrund der Orientierung an quantitativen Daten zur Modellierung zukünftiger Entwicklungen nicht geeignet (vgl. Abschnitt 4.2).

Für die Betrachtung der Validierung einer qualitativen Bewertungsmethode eignen sich informelle Validierungsmethoden aus mehreren Gründen. Erstens passen sich informelle Validierungsmethoden an qualitative Daten an (vgl. Abschnitt 4.2). Sie stützen sich auf Expertenbewertungen, Feedback von Stakeholdern und qualitative Analysen (vgl. Abschnitt 4.2). Durch diesen Ansatz können subjektive Einschätzungen und qualitative Aspekte einer Bewertungsmethode angemessen berücksichtigt werden. Zweitens zeichnen sich informelle Validierungsmethoden durch ihre Flexibilität und Anpassungsfähigkeit aus (vgl. Abschnitt 4.2). Sie lassen sich leicht an die spezifischen Anforderungen und Merkmale eines Bewertungsverfahrens anpassen. Drittens nehmen qualitative Bewertungsmethoden auf subjektive Einschätzungen Bezug (vgl. Abschnitt 4.2). In diesem Zusammenhang können informelle Validierungsmethoden besonders geeignet sein, um die Subjektivität zu erfassen und zu bewerten.

Auf der anderen Seite existieren quantitative Bewertungsmethoden (vgl. Abb. 6). Wenn die inhärente Bewertungsmethode quantitativ ist und eine detaillierte Analyse von numerischen Daten erfordert, sind informelle Validierungsmethoden nicht ausreichend, um die Genauigkeit und Zuverlässigkeit des Bewertungsverfahrens zu überprüfen (vgl. Abschnitt 4.2). In quantitativen Bewertungsmethoden ist die Durchführung objektiver und unvoreingenommener Bewertungen entscheidend, um die Genauigkeit der Ergebnisse zu gewährleisten. Informelle Validierungsmethoden sind möglicherweise nicht ausreichend, um diesen Anforderungen gerecht zu werden. In quantitativen Bewertungsmethoden ist zudem eine klare Struktur und Methodik wichtig, um sicherzustellen, dass die Validierung gründlich und umfassend durchgeführt wird (vgl. Abschnitt 3.2). Informelle Validierungsmethoden bieten möglicherweise nicht die erforderliche Struktur, um eine wirksame Validierung durchzuführen (vgl. Abschnitt 4.2). Datengetriebene, interne, externe und prädiktive Validierungsmethoden eignen sich bei quantitativen Bewertungsmethoden (vgl. Abschnitt 4.2). Die Argumentation basiert auf der gleichen Überlegung wie bei den quantitativen Bewertungskriterien und -parametern. Die Methoden basieren auf einer objektiven Entscheidungsfindung und stellen eine robuste Grundlage für die Validierung der Genauigkeit, Konsistenz und Vorhersagekraft von quantitativen Bewertungsverfahren dar (vgl. Abschnitt 4.2)

Ergänzend zu den Bewertungsmethoden werden die Validierungsmethoden dahingehend bewertet, ob eine genaue oder ungenaue Validierung für die Bewertungsmethode ausreichend ist. Datengetriebene Validierungsmethoden haben eine hohe Genauigkeit bei der Validierung, sofern hochwertige und umfangreiche Daten zur Verfügung stehen (vgl. Abschnitt 4.2). In gleicher Weise verhält es sich mit den internen Validierungsmethoden. Die Präzision interner Validierungsmethoden korreliert maßgeblich mit der Genauigkeit und Vollständigkeit der internen Daten (vgl. Abschnitt 4.2). Externe Validierungsmethoden sind besonders genau, da sie verschiedene Perspektiven und Fachkenntnisse einbringen und potentielle interne Voreingenommenheit reduzieren können (vgl. Abschnitt 4.2). Prädiktive Validierungsmethoden sind genau, wenn die Qualität der zugrunde liegenden Annahmen und Daten hoch ist (vgl. Abschnitt 4.2).

Die Genauigkeit der Ergebnisse ist eng mit der Präzision und Realitätsnähe der verwendeten Modelle verbunden, wobei eine höhere Genauigkeit zu erwarten ist, wenn die Modelle präzise und realitätsnah sind (vgl. Abschnitt 4.2). Informelle Validierungsmethoden sind subjektiv und bieten somit nicht die erforderliche Objektivität und Gründlichkeit, um genaue Bewertungen vorzunehmen (vgl. Abschnitt 4.2). Die Genauigkeit kann abhängig von der Qualität der Diskussionen und Einschätzungen stark variieren (vgl. Abschnitt 4.2). Für den zu konzipierenden morphologischen Baukasten ergeben sich somit die Ausprägungen Bewertungsmethode mit der Unterausprägung Genauigkeit der Validierung für das fünfte und sechste Charakteristikum (vgl. Tab. 26).

Tabelle 26: Fünftes und sechstes Charakteristikum für den morphologischen Kasten

Bewertungsmethode	qualitativ	quantitativ
Genauigkeit der Validierung	genau	ungenau

Als letztes Charakteristikum wird der Einfluss der Komplexität eines Technologiebewertungsverfahrens auf die Auswahl einer geeigneten Validierungsmethode betrachtet. Die Auswahl einer Validierungsmethode sollte darauf abzielen, die spezifischen Anforderungen und die Komplexität des Bewertungsverfahrens zu berücksichtigen (vgl. Abschnitt 3.2). Komplexe Bewertungsverfahren erfordern detaillierte und umfangreiche Validierungsmethoden, um ihre Wirksamkeit zu überprüfen (vgl. Abschnitt 3.2). Die Komplexität eines Technologiebewertungsverfahrens hängt von mehreren Faktoren ab, die im Konzept betrachtet werden müssen, um eine Einschätzung der Komplexität zu erreichen. Zu berücksichtigende Faktoren sind die im Konzept erarbeiteten Charakteristika:

1. Anzahl und Vielfalt der Bewertungskriterien
2. Verfügbarkeit und Qualität der Daten
3. Berücksichtigung von Unsicherheit
4. Betrachtung der Bewertungsmethoden

Je mehr Kriterien berücksichtigt werden müssen und je vielfältiger sie sind, desto komplexer wird ein Technologiebewertungsverfahren (vgl. Abschnitt 2.3). Wenn das Bewertungsverfahren zudem auf umfangreichen und qualitativ hochwertigen Daten basiert, kann dies die Komplexität erhöhen (vgl. Abschnitt 2.3). Die Verwendung umfangreicher und qualitativ hochwertiger Daten kann die Komplexität eines Bewertungsverfahrens erhöhen, da es notwendig ist, diese Daten zu sammeln, bereinigen, analysieren und interpretieren (vgl. Abschnitt 4.2). Dies ist insbesondere der Fall, wenn die Daten heterogen sind oder aus verschiedenen Quellen stammen (vgl. Abschnitt 4.2). Die Integration von Unsicherheiten in das Bewertungsverfahren erhöht die Komplexität, da verschiedene Unsicherheitsquellen berücksichtigt werden müssen, wie z. B. technologische Unsicherheiten, Marktunsicherheiten oder regulatorische Unsicherheiten (vgl. Abschnitt 4.2). Für komplexe Verfahren sind robuste Validierungsmethoden erforderlich, die in der Lage sind mit Unsicherheiten und Variationen umzugehen, um genaue Ergebnisse zu liefern (vgl. Abschnitt 4.2). Die Anwendung fortgeschrittener statistischer oder mathematischer Modelle zur Bewertung der Kriterien oder zur Prognose zukünftiger

Entwicklungen, anstatt von qualitativen Einschätzungen, trägt zudem zu einer höheren Komplexität des Verfahrens bei (vgl. Abschnitt 2.2).

Aufgrund ihrer inhärenten Merkmale sind datengetriebene Validierungsmethoden wie Messvalidierung und statistische Techniken für komplexe Verfahren, die auf umfangreichen Datensätzen beruhen, besonders geeignet (vgl. Abschnitt 4.2). Darüber hinaus ermöglichen derartige Methoden eine objektive Messung des Technologiebewertungsverfahrens (vgl. Abschnitt 4.2). Dadurch wird die Subjektivität reduziert, die bei der Bewertung komplexer Verfahren auftreten kann (vgl. Unterabschnitt 3.1.2). In komplexen Verfahren kann es schwierig sein, die Auswirkungen einzelner Variablen auf das Gesamtergebnis vorherzusagen (vgl. Abschnitt 2.3). Sensitivitätsanalysen sind hierbei effektiv, um die Auswirkungen auf die Evaluierungsergebnisse zu quantifizieren und zu verstehen (vgl. Abschnitt 4.2). Zusammenfassend gilt, je komplexer das Technologiebewertungsverfahren, desto wichtiger die datengetriebenen Validierungsmethoden. Die Methoden stellen eine leistungsfähige und objektive Möglichkeit dar, komplexe Technologiebewertungsverfahren zu validieren (vgl. Abschnitt 4.2). Daher werden die datengetriebenen Validierungsmethoden einer hohen Komplexität des Technologiebewertungsverfahrens zugeordnet.

Wenn das Technologiebewertungsverfahren auf komplexen theoretischen Modellen basiert, sind interne Validierungsmethoden geeignet (vgl. Abschnitt 4.2). Die Methoden ermöglichen eine gründliche Prüfung der relevanten Aspekte im Technologiebewertungsverfahren, sind jedoch zeitintensiv, wenn das Bewertungsverfahren zu komplex ist oder umfangreiche Anpassungen erfordert (vgl. Abschnitt 4.2). Interne Validierungsmethoden erlauben eine präzisere Kontrolle und sind besonders bei komplexen Verfahren von Bedeutung, da interne Daten detaillierter und anwendungsspezifischer sind (vgl. Abschnitt 4.2). Ein weiterer Punkt ist die Anpassungsfähigkeit interner Validierungsmethoden. Diese können an den spezifischen Kontext angepasst werden, in dem das Technologiebewertungsverfahren angewendet wird (vgl. Abschnitt 4.2). Komplexe Verfahren können spezifische Anpassungen erfordern, um beispielsweise verschiedene Aspekte des Technologieumfelds oder der Unternehmensziele angemessen zu berücksichtigen (vgl. Abschnitt 3.2). Für das Konzept werden die internen Validierungsmethoden für komplexe Technologiebewertungsverfahren als geeignet eingestuft.

Ein Nachteil der externen Validierungsmethoden bei komplexen Technologiebewertungsverfahren ist die begrenzte Verfügbarkeit anderer Bewertungsverfahren, die ähnliche Annahmen und Methoden verwenden (vgl. Abschnitt 4.2). Dadurch ist die Methode der Kreuzmodellvalidierung weniger geeignet, weil beispielsweise der Vergleich der Evaluierungsergebnisse mit anderen Ergebnissen erschwert ist (vgl. Abschnitt 4.2). Die empirische Validierung ist bei hoher Komplexität des Technologiebewertungsverfahrens gleichermaßen weniger geeignet (vgl. Abschnitt 4.2). Eine begrenzte Verfügbarkeit relevanter empirischer Daten aus externen Quellen schränken den Einsatz der Methode ein (vgl. Abschnitt 4.2). Demgegenüber bieten experimentelle Validierungsmethoden eine robuste und kontrollierte Möglichkeit, die Leistung eines komplexen Technologiebewertungsverfahrens zu überprüfen und seine Wirksamkeit unter verschiedenen Bedingungen zu bewerten (vgl. Abschnitt 4.2). Daher werden die externen

Validierungsmethoden einer moderaten bis hohen Komplexität von Technologiebewertungsverfahren zugeordnet.

Informelle Validierungsmethoden sind aufgrund ihrer mangelnden Tiefe eher weniger für komplexe Technologiebewertungsverfahren geeignet, da keine ausreichend detaillierte Analyse der Validität erfolgt (vgl. Abschnitt 4.2). Aufgrund der Komplexität des Verfahrens können die Meinungen der Experten stark variieren, was zu Inkonsistenzen in der Validierung führt (vgl. Abschnitt 4.2). Vor diesem Hintergrund sind informelle Validierungsmethoden für weniger komplexe Technologiebewertungsverfahren geeignet.

Bei den prädiktiven Validierungsmethoden ist die Abhängigkeit von externen Quellen oder internen Daten ein ausschlaggebender Grund (vgl. Abschnitt 4.2). Dadurch wird die Prüfung der Konsistenz und der Plausibilität der Voraussagegenauigkeit des Bewertungsverfahrens erschwert, weil die Hypothesenmodelle die Komplexität des Bewertungsverfahrens nicht angemessen abbilden können. Die Anwendung von prädiktiven Validierungsmethoden in komplexen Technologiebewertungsverfahren ist somit abhängig von mehreren Faktoren, u. a. die Unsicherheit im Bewertungsverfahren (vgl. Abschnitt 4.2). Dadurch besteht die Gefahr, dass die Vorhersagegenauigkeit der zugrunde liegenden Zusammenhänge und Beziehungen nicht vollständig verstanden wird (vgl. Abschnitt 4.2). Vor diesem Hintergrund können prädiktive Validierungsmethoden bei adäquaten Voraussetzungen für eine moderate bis hohe Komplexität des Technologiebewertungsverfahrens geeignet sein.

Zusammenfassend ergibt sich für den zu konzipierenden morphologischen Baukasten die Ausprägungen gering, moderat und hoch für das fünfte Charakteristikum der Komplexität eines Technologiebewertungsverfahrens. In der Literatur existieren keine Methoden zur Einschätzung der Komplexität von Technologiebewertungsverfahren, die für diese Arbeit verwendet werden können. Einige Arbeiten beschäftigen sich mit dem Messen der Komplexität von Modellen, die zur Einschätzung herangezogen werden können (Broekel 2007; Maylor et al. 2013; Peliti und Vulpiani 1988). Für diese Arbeit wird eine subjektive Einschätzung angewendet, anhand der vorher beschriebenen Faktoren, die sich auf die Komplexität von Technologiebewertungsverfahren auswirken. Die Ausprägungen für das Charakteristikum Komplexität sind in Tabelle 27 dargestellt.

Tabelle 27: Siebtes Charakteristikum für den morphologischen Kasten

Komplexität	gering	moderat	hoch
-------------	--------	---------	------

Anhand der erarbeiteten Charakteristika von Technologiebewertungsverfahren kann in Kombination mit den vorherigen Schritten eine geeignete Auswahl einer Validierungsmethode erfolgen. Abbildung 28 zeigt den morphologischen Kasten für den Auswahlschritt Charakteristika des Technologiebewertungsverfahrens mit den gewählten Ausprägungen.

Charakteristika des Technologiebewertungsverfahrens	Ausprägungen für den morphologischen Kasten				
Zeitpunkt der Validierung	ex ante			ex post	
Zielsetzung	Wirtschaftlich	Potential	Reifegrad	Technische Machbarkeit	Ganzheitlich
Bewertungskriterien und -parameter	qualitativ		quantitativ		hybrid
Unsicherheit...	...in den Daten	...in den internen Annahmen	...durch externe Einflüsse	...in zukünftigen Entwicklungen	Keine Unsicherheiten
Bewertungsmethode	qualitativ			quantitativ	
Genauigkeit der Validierung	genau			ungenau	
Komplexität	gering		moderat	hoch	

Abbildung 28: Morphologischer Kasten für den Auswahlschritt Charakteristika des Technologiebewertungsverfahrens

Der morphologische Kasten setzt sich aus 7 Attributen zur Charakterisierung von Technologiebewertungsverfahren dar, die in der linken Spalte dargestellt sind (vgl. Abb. 28). Die erarbeiteten Attribute sind in der zweiten Spalte dargestellt. Für eine zielgerichtete Anwendung des entwickelnden Konzepts sind die gewählten Schritte an einem beispielhaften Technologiebewertungsverfahren zu betrachten.

Zusammenfassend wurden in diesem Abschnitt die Abhängigkeiten zwischen den Charakteristika eines Technologiebewertungsverfahrens und der Auswahl einer geeigneten Validierungsmethode erläutert. In diesem Zusammenhang wurden die Vor- und Nachteile sowie Eigenschaften der Validierungsmethoden betrachtet und in den Kontext der Charakteristika gestellt. Anhand sieben ausgewählter Charakteristika (vgl. Abb. 28) wurden Ausprägungen erarbeitet, um die Validierungsmethoden hinsichtlich ihrer Eignung zu unterscheiden. Basierend auf den Ausprägungen wurde anschließend erläutert, inwiefern Validierungsgruppen oder spezifische Validierungsmethoden für die jeweilige Ausprägung geeignet sind. Im folgenden Abschnitt wird das Gesamtkonzept zur Auswahl einer geeigneten Validierungsmethode vollumfänglich dargestellt. Hierbei wird vor allem die korrekte praktische Anwendung betont.

6.3 Beschreibung und Darstellung des Gesamtkonzepts

In diesem Abschnitt wird das in Abschnitt 6.1 und 6.2 entwickelte Konzept in seiner Gesamtheit beschrieben. Dafür werden die verschiedenen Phasen des in Abbildung 27 beschriebenen Ablaufdiagramms in Abhängigkeit ihrer definierten Inhalte dargestellt und zusammenfassend die wichtigsten Aspekte beschrieben. Das Konzept beginnt mit der Beschreibung der Problemsituation und Ausgangssituation, in der ein beispielhaftes Technologiebewertungsverfahren validiert werden soll. Dafür soll eine geeignete Validierungsmethode ausgewählt werden.

Die Beschreibung der Problemsituation umfasst die Identifizierung und Analyse der Herausforderungen sowie der Ziele, die mit der Entscheidungsunterstützung erreicht werden sollen. In diesem Zusammenhang ist es wichtig die Probleme im Vorhinein klar zu definieren und zu quantifizieren, um den Kontext für die Entscheidung über die Auswahl einer geeigneten Validierungsmethode treffen zu verstehen. Darüber hinaus wird die Art der Technologie beschrieben (vgl. Abschnitt 6.1).

Als zweiter Schritt erfolgt die Bewertung der Datenlage und verfügbaren Ressourcen (vgl. Abb. 27). Die Validierung von Technologiebewertungsverfahren ist von entscheidender Bedeutung, um fundierte Entscheidungen im Hinblick auf Investitionen und Forschung zu treffen (vgl. Abschnitt 2.3). Ein grundlegendes Problem bei dieser Validierung ist die mangelhafte Datenlage, beispielsweise von Daten wie Testdaten, historische Daten, Referenzdaten oder echten (vgl. Abschnitt 2.3). Diese Datenlage spielt eine entscheidende Rolle bei der Auswahl und Anwendung geeigneter Validierungsmethoden (vgl. Abschnitt 4.2). Die Einschätzung der Ressourcen ist in Tabelle 28 dargestellt und orientiert sich an den Einschätzungen der Anforderungen der Validierungsmethoden hinsichtlich der Ressourcen in den Tabellen 17-19 (vgl. Unterabschnitt 6.2.1).

Tabelle 28: Einschätzung der Ressourcen Daten, Zeit und Finanzen

Ressource	Ausprägung der Kriterien				
	-	-/o	o	o/+	+
Dateneinschätzung					
Zeitliche Einschätzung	gering		moderat		hoch
Finanzielle Einschätzung	gering		moderat		hoch

In einem dritten Schritt erfolgt die Definition und Festlegung der Validierungsziele. Die Validierungsziele können hierbei je nach Kontext variieren und der Fokus unterschiedlich gesetzt werden (vgl. Abb. 26). Des Weiteren ist die Frage zu klären, ob eine vollständige Validierung oder die Validierung eines Teilaspekts des Technologiebewertungsverfahrens erfolgen soll. Beispielsweise können bei einer Validierung nur die Annahmen und Parameter untersucht werden, die im Verfahren verwendet werden (vgl. Abb. 26). Anschließend kann basierend auf dem definierten Validierungsziel optional eine erste Einschätzung für eine Validierungsmethode erfolgen. Der vierte und fünfte Aspekt umfasst die Betrachtung und Bewertung der Charakteristika eines Technologiebewertungsverfahrens (vgl. Abb. 29)

Kriterien	Attribute	Ausprägungen für den morphologischen Kasten				
Ressourcen- einschätzung	Daten- einschätzung	-	-/o	o	o/+	+
	Zeitliche Einschätzung	gering		moderat		hoch
	Finanzielle Einschätzung	gering		moderat		hoch
Charakteristika des Technologiebewertungsverfahrens	Zeitpunkt der Validierung	ex ante			ex post	
	Zielsetzung	Wirt- schaftlich	Potential	Reife- grad	Technische Machbar- keit	Ganz- heitlich
	Bewertungs- kriterien und -parameter	qualitativ		quantitativ		hybrid
	Unsicherheit...	...in den Daten	...in den internen Annah- men	...durch externe Einflüsse	...in zukünftigen Entwicklungen	Keine Unsicher- heiten
	Bewertungs- methode	qualitativ			quantitativ	
	Genauigkeit der Validierung	genau			ungenau	
	Komplexität	gering		moderat		hoch

Abbildung 29: Vollständiger morphologischer Kasten für das Konzept

In Abschnitt 6.2 wurden die Abhängigkeiten zwischen den Charakteristika eines Bewertungsverfahrens und den Validierungsmethoden ausführlich erläutert und in einem morphologischen Kasten dargestellt (vgl. Abb. 28). In diesem Schritt erfolgt die Bewertung der einzelnen Ausprägungen des morphologischen Kastens anhand des vorliegenden Technologiebewertungsverfahrens. Der vollständige morphologische Kasten besteht somit aus der Ressourceneinschätzung sowie der Bewertung der Charakteristika des Technologiebewertungsverfahrens (vgl. Abb. 29). In Anhang D sind zur Unterstützung bei der Auswahl einer geeigneten Validierungsmethode die Ausprägungen für die verschiedenen Validierungsgruppen markiert und dargestellt, um einen Vergleich für die Bewertung der Ausprägungen zu haben.

Abschließend werden im sechsten Schritt die vorher erzielten Ergebnisse zusammengefasst. Nachdem dieser Schritt erfolgt ist, kann die Bewertung der Eignung einer Validierungsmethode erfolgen, indem die Ergebnisse der vorherigen Schritte analysiert und ausgewertet werden. Tabelle 29 stellt zusammenfassend die Schritte bei der Anwendung des Ablaufschemas dar.

Tabelle 29: Beschreibung der Vorgehensweise bei Anwendung des Ablaufschemas

Problemstellung und Beschreibung der Ausgangssituation
<ul style="list-style-type: none">• Probleme klar definieren und quantifizieren• Zielstellung definieren• Identifikation der Herausforderungen• Beschreibung der Art der Technologie
Bewertung der Datenlage und verfügbaren Ressourcen
<ul style="list-style-type: none">• Umfassende Betrachtung der Datenlage (intern & extern) sowie der verfügbaren zeitlichen und finanziellen Ressourcen• Bewertung der Datenlage (beispielhaft anhand der vorgestellten Bewertungsmetrik in Tabelle 10 oder eigene Bewertungsmetrik)• Einschätzung der Ressourcen anhand Abbildung 29• Abgleich mit Tabelle 17-19
Definieren der Validierungsziele
<ul style="list-style-type: none">• Welche Ziele werden mit der Validierung verfolgt?• Was soll validiert werden? Das gesamte Technologiebewertungsverfahren oder nur ein Teilaspekt?• opt.: Welche Validierungsgruppen sind unter Berücksichtigung der definierten Ziele möglicherweise im Vorhinein besonders geeignet/ungeeignet?
Betrachtung und Bewertung der Charakteristika des Technologiebewertungsverfahrens
<ul style="list-style-type: none">• Vorbereitung durch eine intensive Auseinandersetzung mit dem Technologiebewertungsverfahren• Anwendung des morphologischen Kastens aus Abbildung 29, indem die einzelnen Ausprägungen am Technologiebewertungsverfahren untersucht werden• Bewertung der Ausprägungen• Markieren der ermittelten Ausprägungen des Technologiebewertungsverfahrens
Zusammenfassung der Ergebnisse und Bewertung der Eignung einer Validierungsmethode
<ul style="list-style-type: none">• Betrachtung der ermittelten Ergebnisse aus dem morphologischen Kasten und Zusammenfassung dieser• Abgleich der markierten Felder im morphologischen Kasten mit den Ausprägungen der Validierungsmethoden in Anhang D• Auswahl einer geeigneten Validierungsmethode anhand der ermittelten Übereinstimmung

Tabelle 29 bildet somit den Leitfaden für die Anwendung der Entscheidungsunterstützung zur Auswahl geeigneter Validierungsmethoden für Technologiebewertungsverfahren. Im folgenden Kapitel wird das Konzept anhand eines ausgewählten Beispiels eines Technologiebewertungsverfahrens angewendet. Im Anschluss an die Anwendung des Konzepts erfolgt eine Diskussion der ermittelten Ergebnisse sowie ein Fazit zur Anwendung.

7 Exemplarische Anwendung der Entscheidungsunterstützung

In diesem Kapitel wird das erarbeitete Konzept an einem beispielhaften Technologiebewertungsverfahren validiert. Um einen Überblick über das zu untersuchende Technologiebewertungsverfahren zu erhalten, wird zunächst das Bewertungsverfahren dargestellt und anschließend das Konzept exemplarisch angewendet. Das vorgestellte Technologiebewertungsverfahren wird anhand der Schritte des Ablaufschemas und der erarbeiteten Attribute und Ausprägungen des morphologischen Baukastens beurteilt. Dabei werden die einzelnen Attribute des morphologischen Kastens systematisch am vorliegenden Technologiebewertungsverfahren untersucht und Aussagen bezüglich der Ausprägungen formuliert. Basierend darauf erfolgt eine Auswertung der Anwendungsergebnisse und die Empfehlung einer geeigneten Validierungsmethode. Abschließend erfolgen im letzten Abschnitt des Kapitels eine Diskussion der Ergebnisse sowie ein Fazit der Anwendung des Konzepts. Für die Anwendung wird ein Experteninterview geführt. Der Experte ist im Bereich Technologiemanagement bei der Fraunhofer Forschungsfertigung Batteriezelle (FFB) seit mehreren Jahren tätig. Bei der Fraunhofer FFB handelt es sich um ein Forschungsinstitut für die Batteriezellfertigung.

7.1 Vorstellung des Fallbeispiels

Im folgenden Abschnitt wird der ausgewählte Anwendungsfall bzw. das beispielhafte Technologiebewertungsverfahren näher beschrieben. Das ausgewählte Beispiel eines Technologiebewertungsverfahrens stellt das entwickelte Konzept von Schönmann et al. (2018) dar (vgl. Abschnitt 2.3). Bei dem Konzept von Schönmann et al. (2018) wird ein Fragebogenkonzept sowie Portfolio- und Lebenszyklusmodelle für eine anwendungsorientierte Potentialbewertung angewendet (vgl. Abb. 30).

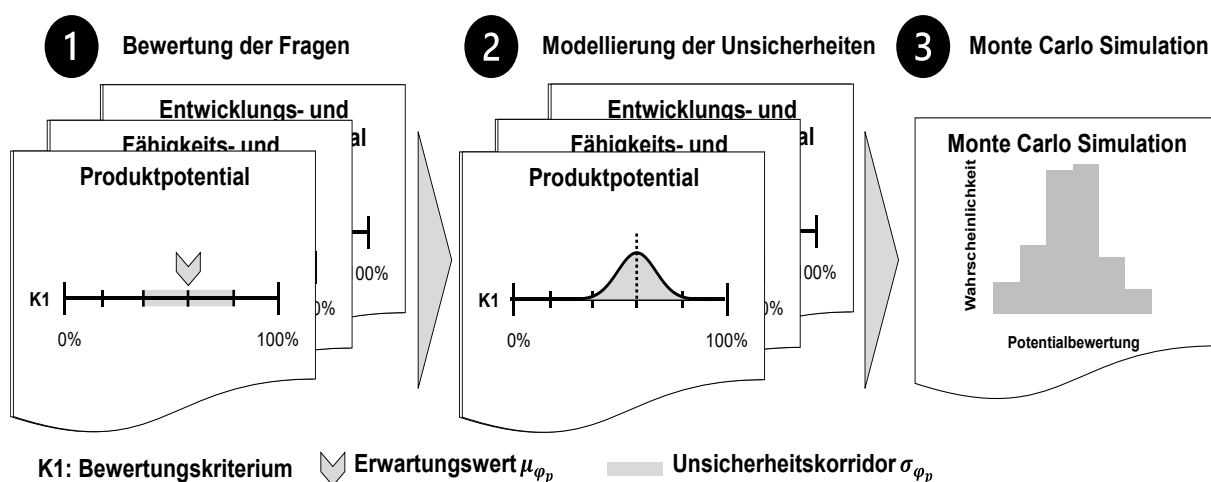


Abbildung 30: Technologiebewertungsverfahren in Anlehnung an Schönmann et al. (2018, S. 9)

Das Ziel des Technologiebewertungsverfahrens stellt die Bewertung des zukünftigen leistungsorientierten Technologiepotentials einer Produktionstechnologie dar (Schönmann et al. 2018). Zur Potentialbewertung wird ein Bewertungsverfahren aus drei Schritten angewendet (vgl. Abb. 30). In einem ersten Schritt werden anhand eines Fragebogens diejenigen Kriterien ausgewählt, die für die Potentialbewertung relevant sind (Schönmann et al. 2018). Hierbei werden 25 relevante qualitative und/oder quantitative Kriterien literaturseitig in einem Workshop abgeleitet (Schönmann et al. 2018). Diese werden anschließend strukturiert, wie in Abbildung 18, dargestellt. Ausgewählte qualitative Kriterien werden anhand einer Angabe des Grades der Zustimmung bewertet, wobei unterschieden wird, ob die Antwort hilfreich für die Bewertung des Leistungspotentials ist (Bewertung mit 1 von [0, ... ,1]) oder nicht (Bewertung mit 0 von [0, ... ,1]) (Schönmann et al. 2018). Folgende Formel wird zur Berechnung der quantitativen Kriterien verwendet, wobei der Wert der Potenzialbewertung b für das jeweilige Kriterium i sich aus der aktuellen Ausprägung w sowie dem strategischen Zielwert s eines Kriteriums zusammensetzt:

$$b_i = \frac{|s_i - w_i|}{\max(s_i, w_i)} \quad (2)$$

Darüber hinaus wird für jede Bewertung b_i eine Sicherheit beigefügt, welche als (geschätzte) Wahrscheinlichkeitsverteilung des Werts w des Kriteriums i um den angegebenen Wert dargestellt wird. Hierbei wird zwischen vier Einschätzungskategorien unterschieden (Schönmann et al. 2018). Anschließend wird das Technologiepotential φ_p determiniert, indem neben den Bewertungen b_i des Kriteriums i die Gewichtung $g_{1,i}$ der Hauptgruppe des Kriteriums i , die Gewichtung $g_{2,i}$ der Untergruppe des Kriteriums i sowie ggf. die Gewichtung $g_{3,i}$ des einzelnen Kriteriums i einbezogen wird (Schönmann et al. 2018):

$$\varphi_p = \frac{\sum_{i=1}^n g_{1,i} g_{2,i} g_{3,i} b_i}{\sum_{i=1}^n g_{1,i} g_{2,i} g_{3,i}} \quad (3)$$

Die Werte des Technologiepotentials φ_p sind auf den Wertebereich [0,1] normiert (Schönmann et al. 2018). Um aus den sicheren und unsicheren Daten einen aggregierten Wert für das Potential einer Produktionstechnologie abzuleiten, verwenden Schönmann et al. (2018) eine Monte Carlo Simulation. Auf Basis der ermittelten φ_p aus jeder Iteration der Simulation werden die Wahrscheinlichkeitsverteilungen und damit der Erwartungswert $\mu_{\varphi p}$ sowie die Standardabweichung $\sigma_{\varphi p}$ des Leistungspotentials φ_p der Produktionstechnologie p ermittelt:

$$\varphi_p = \mu_{\varphi p} \pm \sigma_{\varphi p} \quad (4)$$

Anschließend wird das Technologiepotential φ_p mit dem Kapitalwert κ_p in einem Potential-Wirtschaftlichkeit-Portfolio zusammenfassend dargestellt (vgl. Abb. 31).

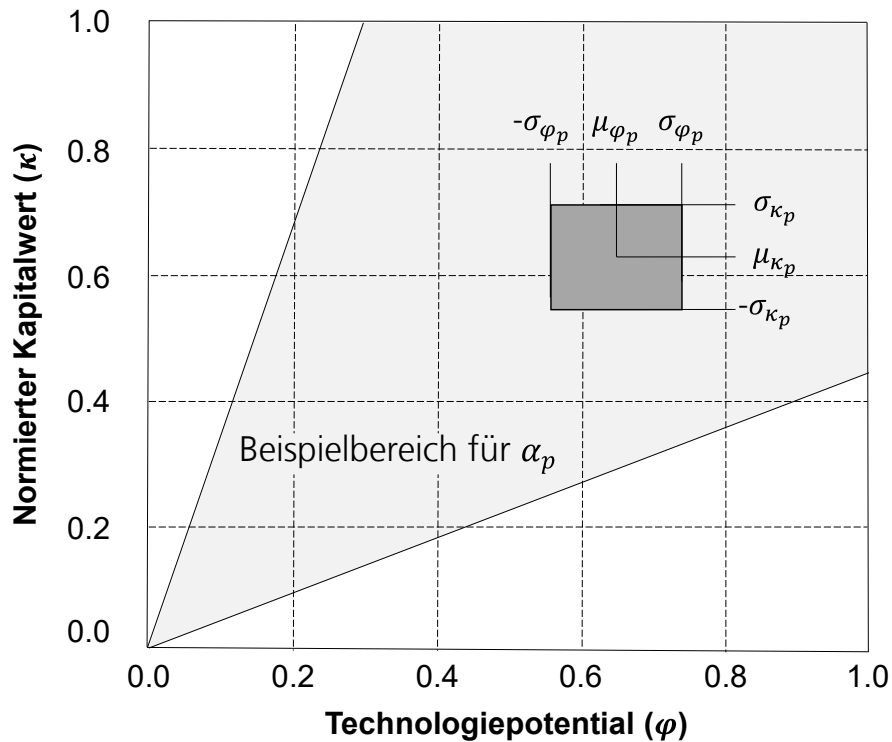


Abbildung 31: Potential-Wirtschaftlichkeits-Portfolio in Anlehnung an Schönmann et al. (2018, S. 10)

Der Kapitalwert κ_p wird nach der Methode von Schindler (2014) ermittelt (vgl. Abschnitt 2.3). In dem Portfolio beschreibt das Technologiepotential φ die x-Achse und der normierte Kapitalwert κ die y-Achse des Diagramms (vgl. Abb. 31). Da für beide Kennzahlen der Produktionstechnologie p unsichere Daten vorliegen, wird diese nicht als Punkt, sondern in Form eines Rechtecks in das Diagramm eingetragen, welches durch die Erwartungswerte μ_{φ_p} und μ_{κ_p} sowie die Standardabweichungen σ_{φ_p} und σ_{κ_p} aufgespannt wird (Schönmann et al. 2018). In diesem Zusammenhang gilt, dass eine Produktionstechnologie eine bessere Bewertung erhält, je weiter sie sich rechts und oben im Portfolio befindet. Mit der Gleichmäßigkeitskennzahl α_p wird das Verhältnis des Technologiepotentials φ_p zum normierten Kapitalwert κ_p einer Produktionstechnologie ausgedrückt und somit ein Lösungsraum für vorteilhafte Lösungen eröffnet (Schönmann et al. 2018).

Als Fallbeispiel aus der Batteriezellproduktion wird das Potential verschiedener Produktionstechnologien der Trockenbeschichtung betrachtet. Bei der Trockenbeschichtung handelt es sich um eine Weiterentwicklung der Beschichtungstechnologie, wobei die Beschichtung ohne den Einsatz von organischen Lösungsmitteln bzw. Wasser stattfindet (Kablitz 2007). Diese innovative Alternative befindet sich noch in der Entwicklungsphase und bedarf weiterer Optimierung und Charakterisierung (Volkswagen AG 2023). Verschiedene Interpretationen des Verfahrens werden in der Literatur vorgestellt, allerdings sind nur wenige Informationen über den Beschichtungsmechanismus dokumentiert (Kablitz 2007).

Für die Validierung des Technologiebewertungsverfahrens wird ein fiktives Szenario betrachtet. Die Fraunhofer FFB möchte in nahegelegener Zukunft eine neue Trockenbeschichtungs-

technologie einführen, um seine Produktion zu optimieren. Hierdurch sollen die Kosten innerhalb der Produktion verringert und die eigene Wettbewerbsposition am Markt gestärkt werden. Dafür entscheidet sich die Fraunhofer FFB das entwickelte Konzept von Schönmann et al. (2018) heranzuziehen, um eine Potentialbewertung durchzuführen. Bevor die Technologiebewertung stattfindet, möchte die Fraunhofer FFB die Gewissheit haben, dass das entwickelte Konzept von Schönmann et al. (2018) als Technologiebewertungsverfahren glaubwürdige und zuverlässige Ergebnisse liefert. Vor diesem Hintergrund soll eine Validierung des dargestellten Technologiebewertungsverfahrens erfolgen. Um das Bewertungsverfahren validieren zu können, soll in einem ersten Schritt eine geeignete Validierungsmethode ausgewählt werden. Im folgenden Abschnitt wird vor diesem Kontext das Konzept zur Auswahl einer geeigneten Validierungsmethode für Technologiebewertungsverfahren an dem Fallbeispiel angewendet.

7.2 Anwendung der entwickelten Entscheidungsunterstützung

Das Konzept zur Entscheidungsunterstützung wird an dem Technologiebewertungsverfahren von Schönmann et al. (2018) angewendet. Dafür wird exemplarisch das Ablaufschema in Abbildung 27 mit dem entwickelten morphologischen Kasten in Abbildung 29 angewendet, um eine geeignete Validierungsmethode zu identifizieren.

Das Ablaufschema beginnt mit der Problemstellung und der Beschreibung der Ausgangssituation (vgl. Abb. 27). Ein wesentliches Problem der Fraunhofer FFB ist die Ungewissheit, ob das Technologiebewertungsverfahren von Schönmann et al. (2018) den Anforderungen entspricht, valide Ergebnisse hinsichtlich der Potentialbewertung von Trockenbeschichtungstechnologien zu liefern. Darüber hinaus stellt die Unwissenheit gegenüber Validierungsmethoden, die für die Validierung des vorliegenden Technologiebewertungsverfahrens geeignet sind, ein weiteres Problem dar (vgl. Abschnitt 7.1). Ausgehend von dieser Problemstellung ergibt sich die Zielstellung für die Anwendung der Entscheidungsunterstützung. Mithilfe der Entscheidungsunterstützung soll unter Berücksichtigung der verfügbaren Ressourcen sowie Charakteristika des Technologiebewertungsverfahrens nach Schönmann et al. (2018) eine geeignete Validierungsmethode für die Fraunhofer FFB identifiziert werden. Eine Herausforderungen in diesem Kontext bildet die Analyse der internen Ressourcenverfügbarkeit der Fraunhofer FFB sowie der externen Datenlage zur Validierung von Verfahren zur Bewertung von Trockenbeschichtungstechnologien. Daher wird ein Experteninterview bei der Fraunhofer FFB mit einem Mitarbeiter im Bereich Technologiemanagement durchgeführt. Der Mitarbeiter beschäftigt sich u. a. mit der Forschung zu Trockenbeschichtungstechnologien und ist daher als Experte geeignet. Bei der zu bewertenden Technologie handelt es sich um eine Trockenbeschichtungstechnologie (vgl. Abschnitt 7.1). Angesichts der strategischen Bedeutung für die zukünftige Ausrichtung des Forschungsinstituts sind die verschiedenen Stakeholder des Instituts die Zielgruppe der Validierung.

Der zweite Schritt des Ablaufschemas umfasst die Bewertung der Datenlage und verfügbaren zeitlichen und finanziellen Ressourcen für die Validierung (vgl. Abb. 27). Für die Bewertung der Datenlage wird die interne und externe Datenverfügbarkeit der für die Validierung wichtigen Daten betrachtet und ausgewertet. Zur Einschätzung der Datenlage wurde u. a. die in

Tabelle 10 erstellte Bewertungsmetrik herangezogen. Die wesentlichen Erkenntnisse für die Einschätzung der Datenlage werden aus dem Interview mit einem langjährigen Mitarbeiter der Fraunhofer FFB gezogen (vgl. Anhang E).

Die Fraunhofer FFB befindet sich aktuell im Aufbau einer Produktionslinie für Lithium-Ion-Batteriezellen. Da die Technologie in der Produktion noch nicht etabliert ist oder in ähnlicher Weise etabliert war, stehen keine internen Produktionsdaten oder historische Daten über Bewertungsergebnisse zur Verfügung, die für die Validierung herangezogen werden können. Dazu zählen detaillierte Informationen über die zu bewertende Technologie, einschließlich ihrer Funktionsweise, Leistung, Eigenschaften und Potential für zukünftige Entwicklung. Darüber hinaus sind keine Informationen über frühere Technologieeinführungen oder -änderungen im Forschungsinstitut zu Trockenbeschichtungstechnologien, einschließlich der Ergebnisse vorhanden. Zudem gibt es innerhalb der Fraunhofer FFB keine weiteren Experten zur Trockenbeschichtungstechnologie, die als Quelle für Daten herangezogen werden können. Vor dem Hintergrund der geringen bis nicht vorhandenen internen Datenlage ist die Validierung anhand einer internen Validierungsmethode im Vorhinein auszuschließen, da derartige Methoden eine gute und ausgeprägte Datenlage benötigen (vgl. Abschnitt 4.2).

Daher muss geprüft werden, ob externe Daten zur Verfügung stehen, die herangezogen werden können (vgl. Unterabschnitt 6.1.1). Aufgrund des Zukunftspotentials der Trockenbeschichtungstechnologie und einer damit verbundenen hohen Forschungsintensität in diesem Bereich sind literaturseitig zahlreiche Quellen vorhanden. Ein Beispiel hierfür ist das jährliche Dry Coating Forum. Aus diesen Quellen können Daten gezogen werden, die für die Validierung verwendet werden können. Relevante Daten stellen Evaluierungsergebnisse aus anderen Technologiebewertungen sowie Daten über die Technologie dar, um diese für das Technologiebewertungsverfahren zu nutzen. Darüber hinaus existieren diverse externe Partner, die für eine Kooperation herangezogen werden können. Ein Beispiel hierfür ist die erwähnte Kooperation mit dem Fraunhofer Institut für Werkstoff- und Strahltechnik IWS. Die Fraunhofer IWS hat eine spezifische Trockenbeschichtungstechnologie entwickelt, wobei die Fraunhofer FFB mitgewirkt hat. In diesem Kontext wurde die Trockenbeschichtungstechnologie anhand von Vorversuchen detailliert und tief betrachtet, allerdings in der Produktion noch nicht getestet. Auf diese Daten könnte zurückgegriffen werden. Die externe Datenlage wurde von dem Experten der Fraunhofer FFB gleich eingeschätzt. Hierbei wurde die TRL mit einbezogen. Für ein TRL von 3-5/6 wurde eine vielfältige, unsichere Grundlage an Daten geschätzt, während bei höheren TRLs weniger über Daten kommuniziert wird. Dies wurde durch die Angst vor Wissensabfluss seitens der Anbieter begründet, vor allem wenn das Unternehmen aus einer ähnlichen Branche stammt. Wesentliche externe Daten können über das Dry Coating Forum, Konferenzbeiträge und Gespräche mit externen Experten gesammelt werden. Für die Bewertung der Datenlage wurde die Bewertungsmetrik in Tabelle 10 beispielhaft für die interne und externe Datenlage ausgewertet (vgl. Anhang E). Die interne Datenlage wird im weiteren Verlauf nicht weiter berücksichtigt. Für den morphologischen Kasten werden die Ausprägungen -, -/o und o als Einschätzungen für die externe Datenlage berücksichtigt.

Die Einschätzung der zeitlichen und finanziellen Möglichkeiten wird anhand des Experten bei der Fraunhofer FFB bewertet. Hierbei wurde erwähnt, dass insbesondere in der Feinanalyse (vgl. Abb. 3) der zeitliche Aspekt der Validierung eines Technologiebewertungsverfahrens keine Rolle spielen und darüber hinaus eine genaue Validierung bevorzugt werden würde. In der Grobanalyse (vgl. Abb. 3) wird eine schnelle, ungenaue Validierungsmethode akzeptiert. Da es sich bei dem vorliegenden Technologiebewertungsverfahren um eine Methode für die Feinanalyse handelt, wird sich darauf bezogen. Dies ist mit der Zeiteffizienz begründet worden. Darüber hinaus spielt diese eine Rolle bei der finanziellen Einschätzung. Die finanzielle Einschätzung wurde auf hoch eingeschätzt, das heißt es würde keine finanziellen Einschränkungen geben. Das Experteninterview hat somit ergeben, dass die Fraunhofer FFB keine zeitlichen und finanziellen Einschränkungen für die Validierung des Technologiebewertungsverfahrens hat. Dies wird mit der Wichtigkeit der strategischen Entscheidung für das Unternehmen begründet, die auf der Bewertung der Trockenbeschichtungstechnologie beruht. Vor diesem Hintergrund ist die Auswertung für die Ausprägungen Ressourcen Daten, Zeit und Kosten in Tabelle 30 dargestellt.

Tabelle 30: Einschätzung der Ausprägungen der Ressourcen am Fallbeispiel

Ressource	Ausprägung der Kriterien				
	-	-/o	o	o/+	+
Dateneinschätzung					
Zeitliche Einschätzung	gering		moderat		hoch
Finanzielle Einschätzung	gering		moderat		hoch

Als nächster Schritt wird das Validierungsziel definiert (vgl. Abb. 27). Die Fraunhofer FFB hat als Ziel ausgegeben, ein zuverlässiges und glaubwürdiges Technologiebewertungsverfahren hinsichtlich der erzielten Ergebnisse und Einschätzungen zu Trockenbeschichtungstechnologien haben zu wollen (vgl. Abschnitt 7.1). Daher ist das Validierungsziel eine ganzheitliche Validierung und eine Vorselektion für eine Validierungsmethode erfolgt nicht. Um die definierten Validierungsziele zu erreichen, werden im nächsten Schritt die Charakteristika des Technologiebewertungsverfahrens betrachtet. Dafür wird der in Abbildung 29 dargestellte morphologische Kasten als Entscheidungsunterstützung herangezogen.

Kriterien	Attribute	Ausprägungen für den morphologischen Kasten				
Ressourcen- einschätzung	Daten- einschätzung	-	-/o	o	o/+	+
	Zeitliche Einschätzung	gering		moderat		hoch
	Finanzielle Einschätzung	gering		moderat		hoch
Charakteristika des Technologiebewertungsverfahrens	Zeitpunkt der Validierung	ex ante			ex post	
	Zielsetzung	Wirt- schaftlich	Potential	Reife- grad	Technische Machbar- keit	Ganz- heitlich
	Bewertungs- kriterien und -parameter	qualitativ		quantitativ		hybrid
	Unsicherheit...	...in den Daten	...in den internen Annah- men	...durch externe Einflüsse	...in zukünftigen Entwick- lungen	Keine Unsicher- heiten
	Bewertungs- methode	qualitativ			quantitativ	
	Genauigkeit der Validierung	genau			ungenau	
	Komplexität	gering		moderat		hoch

Abbildung 32: Auswertung des morphologischen Kastens anhand des Fallbeispiels

Der Zeitpunkt, an dem die Validierung erfolgen soll, ist ex ante. Die Fraunhofer FFB möchte im Vorhinein anhand einer Validierungsmethode validieren, inwiefern das Technologiebewertungsverfahren von Schönmann et al. (2018) für den Zweck einer leistungsorientierten Potentialbewertung für Trockenbeschichtungstechnologien geeignet ist. Für den morphologischen Kasten wird die Ausprägung ex ante gewählt (vgl. Abb. 32).

Das Hauptziel des Technologiebewertungsverfahrens ist die Bewertung des Leistungspotentials von Produktionstechnologien (vgl. Abschnitt 7.1). Durch die Bewertung des Leistungspotentials sollen Anwender die Potentiale und Risiken verschiedener Produktionstechnologien besser einschätzen. Dafür werden verschiedene Aspekte zur Planung und Bewertung von Produktionstechnologien im Artikel präsentiert, die darauf abzielen, die zukunftsorientierte Leistungspotentialbewertung in den Mittelpunkt zu stellen (vgl. Abschnitt 7.1). Durch die Entwicklung eines praxisorientierten Potential-Wirtschaftlichkeits-Portfolios wird die Auswahlentscheidung für oder gegen Technologien objektiviert und unterstützt (vgl. Abschnitt 7.1). Somit ist neben der Bewertung des Potentials eine Bewertung der Wirtschaftlichkeit durchzuführen (vgl. Abschnitt 7.1). Für den morphologischen Kasten werden dahingehend die Ausprägungen Potential und Wirtschaftlich gewählt, welche die Ziele des Portfolios und damit des Verfahrens darstellen.

Als nächstes werden die Bewertungskriterien und -parameter betrachtet (vgl. Abb. 32). Im Konzept zur Bewertung des Leistungspotentials von Produktionstechnologien werden verschiedene quantitative und qualitative Kriterien verwendet. Diese Kriterien werden aus einem Fragebogenkonzept ausgewählt (vgl. Abschnitt 7.1). Beispiele für Kriterien der Bewertung sind die Technologische Reife, der Innovationsgrad, die Umweltverträglichkeit oder das Marktpotential (vgl. Abschnitt 7.1). Für den morphologischen Kasten wurde anhand eines Experten die relevanten Kriterien ausgewählt, die für die Leistungspotentialbewertung der Trockenbeschichtungstechnologien relevant sind. Hierbei wurden sowohl qualitative als auch quantitative Kriterien ausgewählt. Für den morphologischen Kasten wird vor diesem Hintergrund die Ausprägung hybrid gewählt (vgl. Abb. 32).

Das vierte Charakteristikum bezieht sich auf die Betrachtung der Unsicherheit im Bewertungsverfahren. Dafür werden die vier Aspekte betrachtet und bewertet, die im morphologischen Kasten berücksichtigt werden (vgl. Abb. 28). Die Unsicherheit der (Eingangs-)Daten für das Bewertungsverfahren wird in dem Beitrag durch die Zuordnung von Sicherheitskategorien zu den Bewertungen der Kriterien berücksichtigt (vgl. Abschnitt 7.1). In diesem Zusammenhang können die Bewertungen in Kategorien wie „Sichere Aussage“, „Gute Schätzung“, „Grobe Schätzung“ und „Vermutung“ eingeteilt werden, um die Unsicherheit zu quantifizieren (vgl. Abschnitt 7.1). Auszuwählende Validierungsmethoden müssen diese Unsicherheit mit Berücksichtigen und damit umgehen können (vgl. Tab. 24).

Die Unsicherheit in den internen Annahmen wird durch die Verwendung einer Monte Carlo Simulation berücksichtigt (vgl. Abschnitt 7.1). Beispielsweise wird die Unsicherheit der Annahme, ob die technologischen Grenzwerte erreicht werden können, explizit berücksichtigt und in die Bewertung mit einbezogen (vgl. Abschnitt 7.1). Darüber hinaus beruht das Konzept auf festgelegten internen Annahmen über die Entwicklung und den Einsatz der zu bewertenden Technologien (vgl. Abschnitt 7.1). Derartige Annahmen können sich als falsch erweisen oder sich im Laufe der Zeit ändern, was zu einer Unsicherheit in der Bewertung führt (vgl. Unterabschnitt 6.1.2). Daher muss die Validierungsmethode in der Lage sein, bei der Validierung mit dieser Art von Unsicherheit umzugehen (vgl. Tab. 24).

Eine Berücksichtigung oder Erwähnung der Unsicherheit durch externe Einflüsse erfolgt nicht in dem Bewertungsverfahren. Es ist allerdings anzunehmen, dass externe Einflüsse eine Rolle bei der Bewertung von Produktionstechnologien spielen können. Insbesondere ist hier zudem die Tatsache zu berücksichtigen, dass es sich bei der Trockenbeschichtung um eine Produktionstechnologie handelt, die sich gerade in der Entwicklung befindet. In diesem Kontext wird die Leistungspotentialbewertung von externen Einflüssen wie Marktentwicklungen, politische Veränderungen oder technologischen Fortschritten beeinflusst, die oft nicht vorhersehbar sind und somit zu Unsicherheiten in der Bewertung führen können (vgl. Unterabschnitt 6.1.2).

Die Unsicherheit in zukünftigen Entwicklungen für das Bewertungsverfahren wird als ein wichtiger Aspekt im Konzept von Schönmann et al. (2018) betrachtet (vgl. Abschnitt 7.1). In dem Bewertungsverfahren wird eine zukunftsorientierte Potential- und Wirtschaftlichkeitsbewertung unter Unsicherheiten durchgeführt (vgl. Abschnitt 7.1). Dies bedeutet, dass die Berücksichtigung von Unsicherheiten in Bezug auf zukünftige Entwicklungen und Trends von großer

Bedeutung ist, um fundierte Entscheidungen treffen zu können. Daher werden alle Aspekte der Unsicherheit im morphologischen Kasten als Ausprägung gewählt (vgl. Abb. 32).

Bei Betrachtung der angewendeten Bewertungsmethoden im Bewertungsverfahren lassen sich zwei Bewertungsmethoden herausfiltern (vgl. Abschnitt 7.1). Zum einen wird ein Fragebogenkonzept zur Auswahl geeigneter Kriterien angewendet (vgl. Abschnitt 7.1). Des Weiteren wird ein Portfolioansatz zur Darstellung der Wirtschaftlichkeit und des Potentials einer Produktionstechnologie verwendet (vgl. Abschnitt 7.1). Bei dem Fragenbogenkonzept handelt es sich um eine qualitative Bewertungsmethode, da hier Kriterien anhand der Einschätzung von Experten ausgewählt werden (vgl. Abschnitt 7.1). Der Portfolioansatz berücksichtigt sowohl qualitative als auch quantitative Aspekte. Portfolioansätze sind überwiegend qualitative Ansätze, weshalb die Einschätzung auf eine qualitative Bewertungsmethode gesetzt wird (vgl. Abb. 6). Vor diesem Hintergrund wird für den morphologischen Kasten die Ausprägung einer qualitativen Bewertungsmethode gewählt (vgl. Abb. 32). Aufgrund der Wichtigkeit der Entscheidung für das strategische Technologiemanagement bevorzugt die Fraunhofer FFB eine genaue Validierung des Bewertungsverfahrens. Eine sorgfältige Validierung des Bewertungsverfahrens soll sicherstellen, dass die angewendeten Methoden geeignet sind, um die Leistungsfähigkeit und das Potential von Produktionstechnologien zu bewerten. Durch eine genaue Validierung sollen mögliche Fehlerquellen identifiziert und korrigiert werden, um sicherzustellen, dass die Bewertungsergebnisse verlässlich sind und fundierte Entscheidungen auf ihrer Grundlage getroffen werden können.

Die Komplexität der vorgestellten Bewertungsmethode wird als moderat bis hoch eingestuft (vgl. Abb. 32). Im Normalfall werden 25 qualitative und quantitative Bewertungskriterien berücksichtigt, die gegebenenfalls nach oben hin angepasst werden können (vgl. Abschnitt 7.1). Zudem kann die Verfügbarkeit und Qualität der Daten aufgrund der Entwicklungsstufe der Trockenbeschichtungstechnologie eingeschränkt sein. Dies erschwert die Einschätzung der Bewertungskriterien und erhöht die Komplexität der Anwendung des Verfahrens. Darüber hinaus ist Anzahl der Bewertungskriterien mit 25 Kriterien als hoch einzuschätzen. Nach Auswertung des Experteninterviews ist die Datenlage sowohl intern als auch extern eingeschränkt. Zudem werden bei den qualitativen und den quantitativen Bewertungskriterien Unsicherheiten berücksichtigt, die mit in die Bewertung einfließen (vgl. Abschnitt 7.1). Darüber hinaus wurden die vier in die Entscheidungsunterstützung integrierte Unsicherheiten festgestellt, die die Komplexität des Bewertungsverfahrens zusätzlich erhöhen. Es werden Fragebogenkonzepte, Portfolio- und Lebenszyklusmodellen sowie eine Monte Carlo Simulation verwendet, um das Technologiepotential und die Wirtschaftlichkeit zu bewerten (vgl. Abschnitt 7.1). Dies erfordert eine strukturierte Herangehensweise und eine detaillierte Analyse, um fundierte Entscheidungen ableiten zu können. Die Bewertungsmethoden sind mit dem Fragebogenkonzept und dem Portfolio überwiegend qualitativ, was wiederum zu einer Verringerung der Komplexität führt.

Nach der Betrachtung der Charakteristika des Technologiebewertungsverfahrens erfolgt in einem nächsten Schritt die Bewertung der Charakteristika des Technologiebewertungsverfahrens. In diesem Kontext werden die ausgewählten Ausprägungen aus Abbildung 32 mit den Tabellen der Auswertungen für die verschiedenen Validierungsgruppen in Anhang D in den

Zusammenhang gestellt wird. Nach dem Abgleich des morphologischen Kastens aus Abbildung 32 mit den Tabellen in Anhang D ergeben sich die folgenden Erkenntnisse.

Interne Validierungsmethoden eignen sich nicht am Fallbeispiel, da im Vorhinein keine internen Daten für eine mögliche Validierung zur Verfügung stehen. Datengetriebene Validierungsmethoden eignen sich aufgrund der unzureichenden Datenlage nicht für die Validierung des Fallbeispiels (vgl. Tab. 28). Weitere Ausschlusskriterien der datengetriebenen Validierungsmethoden bilden die qualitative Bewertungsmethode sowie die hybriden Bewertungskriterien und -parameter, die im Technologiebewertungsverfahren angewendet werden (vgl. Abschnitt 7.2). Prädiktive Validierungsgruppen eignen sich potentiell für die Validierung des Technologiebewertungsverfahrens, da die Attribute eine vollständige Übereinstimmung haben. Ein wesentlicher Nachteil besteht allerdings in dem hohen zeitlichen Aufwand, bis eine Validierung erreicht wird (vgl. Abschnitt 4.2). Darüber hinaus ist die Einschätzung der Datenlage am unteren Rand für prädiktive Validierungsmethoden, was die Anwendung auf die qualitative prädiktive Validierung beschränkt (vgl. Unterabschnitt 6.1.1).

Die gewählten Ausprägungen für das Technologiebewertungsverfahren stimmen mit denen für die Validierungsgruppe informell in jedem Attribut überein, ausgenommen der Genauigkeit der Validierung. Bei der externen Validierungsgruppe ergibt sich eine vollständige Übereinstimmung. Eine Ausnahme bildet die Unsicherheit der internen Annahmen, wofür sich externe Validierungsmethoden eher weniger eignen (vgl. Tab. 24). Ein Nachteil der externen Validierungsmethoden stellt der hohe zeitliche sowie finanzielle Aufwand im Vergleich zu den informellen Validierungsmethoden dar (vgl. Unterabschnitt 6.1.1). Ein wesentlicher Vorteil besteht in der Genauigkeit der externen Validierungsmethoden (vgl. Unterabschnitt 6.1.2). Aufgrund der wesentlichen Vorteile und Nachteile beider Validierungsgruppen für die Validierung des Technologiebewertungsverfahrens, wird eine Kombination der beiden Validierungsgruppen in Erwägung gezogen. Anhand der externen Validierungsmethode wird die Objektivität und Validität des Bewertungsverfahrens gestärkt, da die Ergebnisse von unabhängigen Quellen überprüft wird (vgl. Abschnitt 4.2). Informelle Validierungsmethoden können als ergänzende Maßnahme zur Validierung des Technologiebewertungsverfahrens dienen, sind allerdings möglicherweise nicht ausreichend, um die Genauigkeit und Zuverlässigkeit des Verfahrens sicherzustellen. Ein wesentlicher Nachteil besteht in der subjektiven Natur und der fehlenden Objektivität für derartig komplexe Verfahren, die im Fallbeispiel u. a. durch die hohe Unsicherheit sowie Anzahl und Art der Bewertungskriterien bedingt ist (vgl. Unterabschnitt 6.1.2). Daher eignen sich informelle Validierungsmethoden in diesem Fallbeispiel nicht als alleinige Grundlage für die Validierung und eine Kombination mit externen Validierungsmethoden ist sinnvoll. Als mögliche Methoden innerhalb der Validierungsgruppen eignen sich insbesondere die Kombination von Expertenmeinungen mit dem Vergleich durch andere Technologiebewertungsverfahren oder der empirischen Validierung.

Externe Validierungsmethoden sind im Gegensatz zu prädiktiven Validierungsmethoden geringer im zeitlichen Aufwand, weshalb sie als vorteilhafter in dem Fallbeispiel angesehen werden (vgl. Unterabschnitt 6.1.1). Darüber hinaus ist die qualitative prädiktive Validierung im Gegensatz zu den externen Validierungsmethoden nicht genau. Eine Kombination von

prädiktiven und externen Validierungsmethoden wurde zudem in Erwägung gezogen, allerdings aufgrund der geringeren Vereinbarkeit als mit informellen Validierungsmethoden nicht gewählt. Abbildung 33 stellt zusammenfassend die Ergebnisse der Auswertung dar.

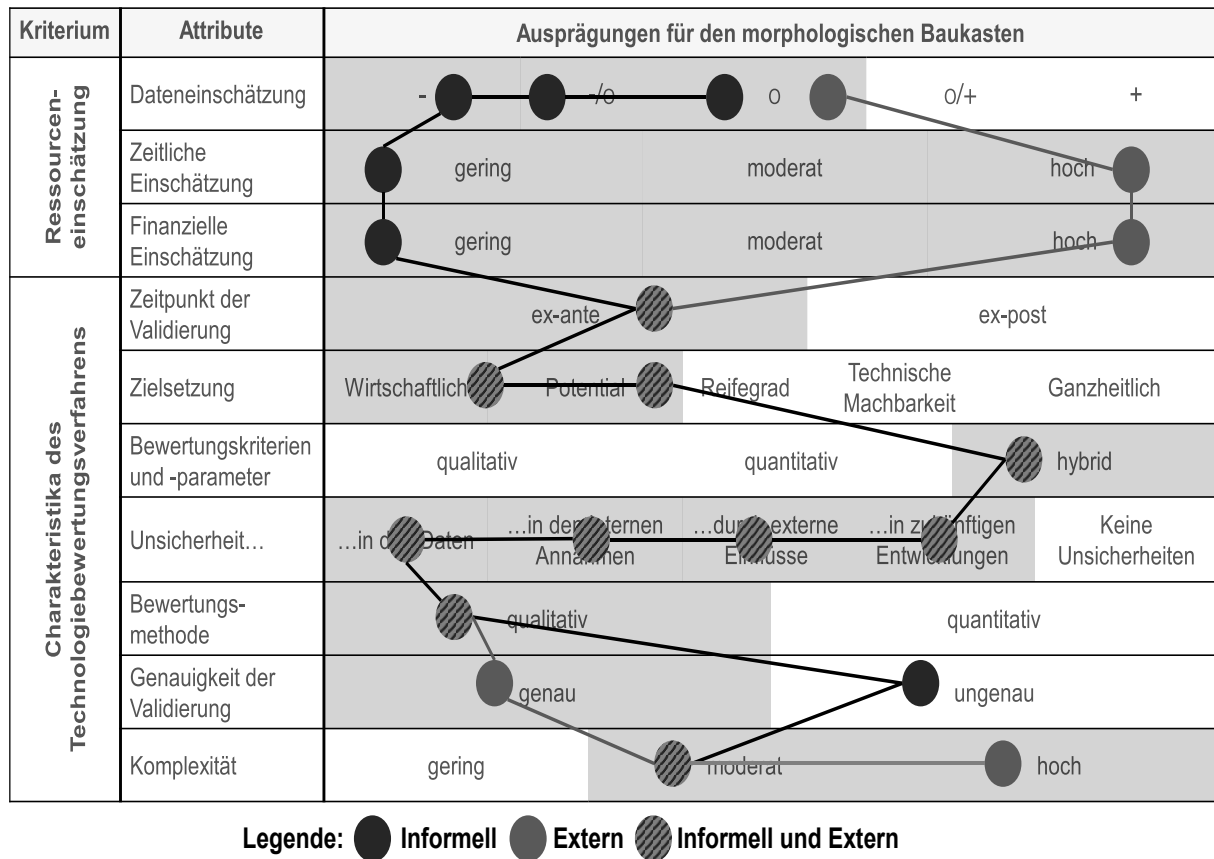


Abbildung 33: Auswertungsergebnisse des morphologischen Kastens

Abbildung 33 zeigt die Übereinstimmung von informellen und externen Validierungsmethoden mit der Auswertung des morphologischen Kastens am Fallbeispiel. Die Ausprägungen stimmen für externe Validierungsmethoden vollständig überein, während bei den informellen die Genauigkeit der Validierung eine Ausprägung darstellt, die nicht erfüllt wird (vgl. Abb. 33). Zusammenfassend wurde anhand des Ablaufschemas und des morphologischen Kastens geeignete Validierungsgruppen identifiziert. Als mögliche Validierungsgruppen sind prädiktive, externe und informelle Validierungsmethoden für das Fallbeispiel als geeignet eingestuft worden. Nach einer Abwägung wurde sich final auf eine Kombination von einer externen Validierungsmethode mit einer informellen Validierungsmethode verständigt. Im folgenden Abschnitt wird basierend auf den Ergebnissen der Anwendung der Entscheidungsunterstützung das entwickelte Konzept kritisch betrachtet.

7.3 Diskussion und Fazit

Im Folgenden wird die entwickelte Entscheidungsunterstützung zur Auswahl geeigneter Validierungsmethoden für Technologiebewertungsverfahren (vgl. Abschnitt 6.3) bewertet und diskutiert. Dies beinhaltet u. a. die Berücksichtigung der gestellten Anforderungen des Konzepts (vgl. Abschnitt 5.1), des entwickelten Ablaufschemas (vgl. Abb. 27) sowie des entwickelten

morphologischen Baukastens (vgl. Abb. 32). Grundlage der Diskussion und Bewertung bildet die beispielhafte Anwendung der Entscheidungsunterstützung an einem Fallbeispiel in Abschnitt 7.2.

Das in Abschnitt 6.1 entwickelte Ablaufschema bildet einen strukturierten Ansatz zur Auswahl geeigneter Validierungsmethoden für Technologiebewertungsverfahren. Mithilfe dieses Ablaufschemas ist es möglich, geeignete Validierungsmethoden basierend auf einem Technologiebewertungsverfahren auszuwählen (vgl. Abschnitt 7.2). Vor diesem Hintergrund stellt die Arbeit einen ergänzenden Forschungsansatz zur Auswahl geeigneter Validierungsmethoden dar (vgl. Abschnitt 2.3). Die bisherigen Forschungsansätze bezogen sich auf die Auswahl von Validierungsmethoden für Simulation und Modelle, allerdings nicht spezifisch für Technologiebewertungsverfahren. Somit schließt die entwickelte Entscheidungsunterstützung eine Lücke in der Forschung für die Anwendung von Validierungsmethoden in spezifischen Bereichen.

Anhand einer systematischen Literaturrecherche wurden geeignete Validierungsmethoden identifiziert. Es wurde gezeigt, dass sich die Validierungsmethoden anhand verschiedener Ressourcen sowie anhand der Charakteristika eines Technologiebewertungsverfahrens einordnen lassen (vgl. Abschnitt 6.2). Durch die Ableitung von Eigenschaften sowie wesentlichen Vor- und Nachteilen der verschiedenen Validierungsmethoden in Anlehnung an die aus der Literaturrecherche ermittelten Quellen wurde sichergestellt, dass die wesentlichen Aspekte der Validierungsmethoden für das Konzept berücksichtigt wurden. Basierend darauf konnte der Zusammenhang zu den wesentlichen Ressourcen (vgl. Unterabschnitt 6.2.1) sowie Charakteristika eines Technologiebewertungsverfahrens (vgl. Unterabschnitt 6.2.2), die einen Einfluss auf die Auswahl einer Validierungsmethode haben, hergestellt werden. In dieser Arbeit wurde für die Darstellung der Zusammenhänge ein morphologischer Baukasten entwickelt (vgl. Abb. 29). Dieser stellt einer der ersten Ansätze zur Auswahl geeigneter Validierungsmethoden für Technologiebewertungsverfahren dar, indem die Schnittstellen der Themengebiete betrachtet werden. Dabei wird durch die entwickelte Entscheidungsunterstützung eine praxisnahe Einordnung von Validierungsmethoden bezüglich ihrer Eignung für diverse Technologiebewertungsverfahren dargestellt.

Erste Herausforderungen bei der Entwicklung der Entscheidungsunterstützung wurden bei dem ersten Schritt des methodischen Vorgehens, der Suche nach geeigneter Validierungsmethoden für Technologiebewertungsverfahren, ersichtlich. In Kapitel 4 konnten bei der systematischen Literaturrecherche nur eine geringe Anzahl an Literaturen identifiziert werden, die sich explizit auf Methoden der Validierung für Technologiebewertungsverfahren für Produktionstechnologien beziehen (vgl. Abschnitt 4.1). Daher musste als Konsequenz auf weitere Literaturen, die nicht spezifisch auf dieses Themengebiet spezialisiert waren, zurückgegriffen werden. Vor diesem Hintergrund sind folgende Fragen kritisch zu betrachten: Sind die ausgewählten Validierungsmethoden für die konzipierte Entscheidungsunterstützung geeignet? Fehlen in diesem Kontext relevante Validierungsmethoden, die in der Entscheidungsunterstützung nicht berücksichtigt wurden? Sind die erarbeiteten Validierungsgruppen als geeignet einzustufen, oder wäre eine andere Gruppenbildung zielführender? Im Rahmen der gebildeten

Validierungsgruppen sowie der ausgewählten Validierungsmethoden ist die Entscheidungsunterstützung inhaltlich als angemessen zu bewerten.

Ein Vorteil des entwickelten Ablaufschemas besteht darin, dass es, vergleichbar mit Vorgehensmodellen (vgl. Kapitel 4), eine klare Anleitung zur Durchführung bereitstellt. Hierbei spielt die individuelle Erfahrung des Anwenders eine weniger bedeutende Rolle. Dadurch wird die Hürde, sich mit den Eigenschaften verschiedener Validierungsmethoden zu befassen, verringert und eine praktische Anwendung im Alltag wahrscheinlicher. Die einzelnen Schritte sind einfach gewählt und beschrieben, um die Nachvollziehbarkeit und Anwendung in der Praxis zu erleichtern. Trotz des einfach anzuwendenden Ablaufschemas ist dieses kritisch zu bewerten, da festgelegte Schritte im Ablaufschema möglicherweise in der Tiefe zu komplex gestaltet sind. So sind innerhalb des Bewertungsschritts der Datenlage und Ressourcen im Ablaufschema mehrere Schritte durchzuführen, die sich in der Anwendung als herausfordernd herausstellen können. Beispiele hierfür sind Einschätzungen über die interne und externe Datenlage sowie der Einschätzung der finanziellen Möglichkeiten beim Anwender. Hierbei spielt zudem die Ungewissheit über das Vorgehen zur richtigen Einschätzung eine entscheidende Rolle, die die Anwendung des Ablaufschemas negativ beeinflussen können. Vor diesem Hintergrund ist anzumerken, dass der zeitliche und schriftliche Rahmen der Arbeit eine genauere Ausarbeitung nicht möglich gemacht haben.

Neben dem Ablaufschema wurde ein morphologischer Kasten entwickelt, der die Schritte der Auswertung der Ressourcenverfügbarkeit sowie die Auswertung für die Charakteristika eines Technologiebewertungsverfahrens vereinfacht darstellen soll (vgl. Abb. 29). Der morphologische Kasten beruht auf der Grundidee, Attribute zur Ressourcenverfügbarkeit und allgemeiner Charakteristika von Technologiebewertungsverfahren in den Bezug der Eignung einer Validierungsmethode zu stellen (vgl. Abschnitt 6.3). Die Attribute wurden in diesem Kontext aus der Literatur herausgearbeitet, basierend auf den Eigenschaften der Validierungsmethoden und der von Technologiebewertungsverfahren. Für die Attribute wurden anschließend geeignete Ausprägungen gewählt (vgl. Abschnitt 6.2).

Hierbei ist die Auswahl der gewählten Ausprägungen für die Attribute kritisch zu betrachten. Aufgrund der Tatsache, dass nicht für jedes literaturseitig gewählte Attribut angemessene Ausprägungen vorzufinden sind, mussten diese teilweise selbst gewählt werden (vgl. Unterabschnitt 6.2.1). Dies wirkt sich negativ auf die Genauigkeit der Entscheidungsunterstützung aus, da die Ausprägungen möglicherweise unpassend ausgewählt bzw. definiert wurden. Ein weiteres Problem, das während der Konzeptionierung des morphologischen Kastens aufgetreten ist, war ein angemessenes Ausmaß der Attribute zu finden. Der Aufbau des morphologischen Kastens mit 10 Attributen mit Ausprägungen ist dahingehend möglicherweise als zu komplex einzustufen, was zu Schwierigkeiten in der Entscheidungsfindung führen kann. Dies hängt u. a. mit der gewählten Vorgehensweise zusammen. Die Komplexität des morphologischen Kastens steht im Kontrast zum einfachen Ablaufschema, das im Vorhinein entwickelt wurde. Für einige Ausprägungen der Attribute konnten keine Ja- oder Nein- Entscheidung (vgl. Tab. 24) getroffen werden, wodurch das Ziel der Auswahl einer geeigneten Validierungsmethode in spezifischen Fällen möglicherweise nicht ausreichend genau getroffen werden kann. In

diesem Kontext ist die Relevanz der gewählten Attribute und Ausprägungen für die Auswahl einer geeigneten Validierungsmethode kritisch zu hinterfragen. Darüber hinaus ist die Eignung der Methode des morphologischen Kastens kritisch zu bewerten. In Anbetracht der Komplexität des Themengebiets bildet der morphologische Kasten eine übersichtliche und visuell vereinfachte Darstellung der Zusammenhänge dar. Dadurch wird die Komplexität der Auswahl einer geeigneten Validierungsmethode in Bezug auf ein vorliegendes Technologiebewertungsverfahren möglicherweise nicht angemessen abgebildet. Dies wirkt sich wiederum negativ auf die Genauigkeit der Entscheidungsunterstützung aus.

Die Anwendbarkeit der Entscheidungsunterstützung mit seinem zugehörigen Ablaufschema zur Auswahl geeigneter Validierungsmethoden für Technologiebewertungsverfahren wurde durch die Anwendung an einem Fallbeispiel in Abschnitt 7.2 dargestellt. Bei der Anwendung wurde ein Fallbeispiel bei der Fraunhofer FFB betrachtet und beispielhaft an einem Technologiebewertungsverfahren für die Bewertung des Leistungspotentials einer Produktionstechnologie ausgewertet (vgl. Abschnitt 7.2). In diesem Zusammenhang wird deutlich, dass die Anwendung in der Praxis zu einem Ergebnis einer geeigneten Validierungsmethode geführt hat. Auch wenn eine geeignete Validierungsmethode identifiziert werden konnte, ist der Weg zu dieser Entscheidung als kritisch zu bewerten.

Erstens ist die Entscheidungsfindung durch einen hohen Anteil an Subjektivität gekennzeichnet. Die Auswahl der Ausprägungen, insbesondere bei der Ressourcenverfügbarkeit, wurde basierend auf der Einschätzung eines Experten getroffen. Möglicherweise wäre das Einholen von Meinungen mehrerer Experten sinnvoller, um eine detaillierte Auswertung für den morphologischen Kasten zu erreichen. Dies war aufgrund des zeitlichen Rahmens und der teilweise fehlenden Expertise zu Trockenbeschichtungstechnologien bei der Fraunhofer FFB nicht möglich. Dies wirkt sich negativ auf die Sicherheit der Entscheidungsunterstützung aus. Hierbei hat die Entscheidungsunterstützung noch Entwicklungsbedarf, um den Anwender die Entscheidungsfindung zu erleichtern.

Zweitens wurden bei der Anwendung des morphologischen Kastens mehrere Lösungen erzielt. Dies stellt keinen nachteiligen Aspekt der Entscheidungsunterstützung dar. Allerdings steht der Anwender anschließend vor der Frage, welche Validierungsmethode der erzielten Lösungen die geeignetste ist bzw. ob eine mögliche Kombination der Validierungsmethoden potentiell als Lösung in Frage kommt. Dafür sind Kenntnisse über die Validierungsmethoden nötig, die möglicherweise bei der Anwendung des Konzepts nicht zur Verfügung stehen. Hierbei hat die Entscheidungsunterstützung weiteren Entwicklungsbedarf, um den Anwender die Entscheidungsfindung zu erleichtern. Zudem wäre eine anschließende Gewichtung der unterschiedlichen Ausprägungen in Bezug auf die Auswertung zielführend, um eine geeignete Validierungsmethode auswählen zu können. Die Gewichtung wurde bei der Anwendung nur oberflächlich betrachtet, wodurch die Genauigkeit der Entscheidungsunterstützung gesenkt wurde. Darüber hinaus gestaltet sich die Identifizierung einer geeigneten Validierungsmethode innerhalb der ausgewählten Validierungsgruppe als schwierig. Dies ist bedingt durch die Diversität der Methoden innerhalb der Validierungsgruppen sowie die eingeschränkte Berücksichtigung spezifischer Validierungsmethoden in der entwickelten Entscheidungsunterstützung. Eine

sinnvolle Ergänzung des Ablaufschemas wäre eine anschließende Überprüfung der Eignung der Validierungsmethoden innerhalb der Validierungsgruppen.

Drittens ist der Aufwand der Entscheidungsunterstützung, u. a. bedingt durch die ersten beiden genannten Aspekte, als möglicherweise zu hoch einzuschätzen. Darüber hinaus ist der möglicherweise hohe Aufwand der Einschätzung der Ressourcenverfügbarkeit sowie die notwendige intensive Auseinandersetzung mit dem Technologiebewertungsverfahren zu berücksichtigen (vgl. Unterabschnitt 6.2.1).

Ein weiteres wesentliches Problem der gezeigten Anwendung besteht darin, dass die ausgewählten Validierungsmethoden nicht am Beispiel des Technologiebewertungsverfahrens angewendet wurden. Dies würde die Validierung der Entscheidungsunterstützung noch weiter stärken. Aufgrund der zeitlichen Einschränkung sowie dem eingrenzenden Umfang der Arbeit war dies leider nicht möglich. Somit würde ein weiterer Forschungsschritt die tatsächliche Anwendung der ausgewählten Validierungsmethoden am Verfahren selbst darstellen, um die Validität der Entscheidungsunterstützung weiter zu untersuchen.

Dem gegenüber stehen positive Aspekte, die aus der Anwendung der Entscheidungsunterstützung gezogen werden können. Die Schritte des Ablaufschemas erwiesen sich als geeignet ausgewählt, da sie eine strukturierte, einfache Vorgehensweise darstellen. Eine Beschreibung der Problemstellung und Ausgangssituation sowie eine Definition der Validierungsziele im Vorhinein ermöglichten eine klare Ausrichtung für die Anwendung der Entscheidungsunterstützung. Darüber hinaus ist die Anwendung des morphologischen Kastens für die Auswertung der Charakteristika eines beispielhaften Technologiebewertungsverfahrens als schnell einzuordnen im Verhältnis zur komplexen Thematik. Dies ist bedingt durch die Auswahl der Ausprägungen der Attribute, welche größtenteils eine schnelle Auswertung ermöglichen und keine komplizierten Überlegungen benötigen. Dadurch konnten auf vereinfachte Weise, trotz hoher Komplexität der Validierungsmethoden, drei geeignete Validierungsgruppen identifiziert werden (vgl. Abschnitt 7.2).

Abschließend werden die gesammelten Erkenntnisse in den Zusammenhang der definierten Anforderungen der Entscheidungsunterstützung gestellt (vgl. Abschnitt 5.1). Die erwähnten Anforderungen, die mit der Richtigkeit, Zweckmäßigkeit, Zuverlässigkeit, Empirische und Formale Richtigkeit, Vollständigkeit und Transparenz sowie Handhabbarkeit und Zweckorientierung an die Entscheidungsunterstützung gestellt wurden, wurden nicht gänzlich erfüllt. Eine klare Struktur, wie eine geeignete Validierungsmethode für ein Technologiebewertungsverfahren ausgewählt wird, konnte in dieser Arbeit nicht in einem angemessenen Rahmen gelöst werden. Dies ist u. a. verbunden mit der Tatsache, dass die Validierung von Technologiebewertungsverfahren ein komplexes Themengebiet darstellt und die Validierungsmethoden in ihren Eigenschaften komplex sind. Dadurch ist es schwierig, Validierungsmethoden anhand geeigneter Kriterien hinsichtlich ihrer Eignung für ein Technologiebewertungsverfahren zu unterscheiden.

Die *Richtigkeit* der Entscheidungsunterstützung ist aufgrund der gewählten Komplexität beim Erstellen des Konzepts nicht gänzlich gewährleistet. Eine allgemeinere Erfassung der Attribute

hätte einen positiven Einfluss auf die Richtigkeit bzw. Vollständigkeit des Konzepts. Eine bessere Wahl der Attribute würde die Richtigkeit des morphologischen Kastens gewährleisten.

Die *Zweckmäßigkeit* ist neben der Richtigkeit aufgrund der gewählten Komplexitätsstufe nicht gänzlich eingehalten worden. Hierbei steht die Einfachheit des Ablaufschemas und des morphologischen Kastens im Kontrast zur Komplexität der Validität von Technologiebewertungsverfahren und der angewandten Methoden, weshalb die gewählte Komplexität zum Teil begründet ist. Die *Zulässigkeit* der Entscheidungsunterstützung ist anhand der erläuterten Randbedingungen gegeben.

Anhand der Validierung beim Anwendungspartner Fraunhofer FFB konnte die *Empirische und Formale Richtigkeit* der Entscheidungsunterstützung zum Teil überprüft werden. Einige Aspekte der Entscheidungsunterstützung konnten aufgrund einer fehlenden Expertise im Forschungsinstitut nicht im Detail überprüft werden. Dies hat negative Auswirkungen auf die Empirische und Formale Richtigkeit der Entscheidungsunterstützung.

Die *Vollständigkeit und Transparenz* ist nicht vollständig gegeben, da in der Literatur weitere Validierungsmethoden existieren, die der Entscheidungsunterstützung gegebenenfalls hinzugefügt werden können. Darüber hinaus wurden nicht alle Charakteristika eines Technologiebewertungsverfahrens mitberücksichtigt. Bei der Entscheidungsunterstützung konnten aufgrund der Komplexität der Aufgabe nicht alle Faktoren berücksichtigt werden, die Auswirkungen auf die Aussagen zur Eignung einer Methode der Validierung haben. Die Vollständigkeit und Transparenz der Entscheidungsunterstützung ist verfälscht unter der Tatsache, dass einige Attribute nicht Teil des morphologischen Kastens sein sollten.

Die *Handhabbarkeit und Zweckorientierung* sind aufgrund der gewählten Komplexität nur zum Teil gewährleistet. Eine Auseinandersetzung mit dem Thema ist aufgrund der Komplexität unvermeidbar, um einen Überblick der Eigenschaften der Validierungsmethoden zu erhalten und den Aufbau der Entscheidungsunterstützung nachvollziehen zu können.

Zusammenfassend bietet die entwickelte Entscheidungsunterstützung und der darin enthaltene morphologische Kasten eine gute Orientierung zur Bewertung der Eignung einer Validierungsmethode für Technologiebewertungsverfahren. Die entwickelte Entscheidungsunterstützung zeichnet sich durch einige inhaltliche Fehler aus, die sich negativ auf die Korrektheit auswirken. Das größte Problem der Entscheidungsunterstützung besteht darin, dass mit der Anwendung ein hoher Aufwand verbunden ist, um eine angemessene Aussage über die Eignung einer Validierungsmethode zu erhalten. Eine weitere wesentliche Herausforderung der Entscheidungsunterstützung bestand darin, die passenden Attribute und Ausprägungen beim Erstellen des morphologischen Kastens zu wählen. Durch das Ablaufschema und den morphologischen Kasten wurde allerdings ein erster, strukturierter Ansatz zur Auswahl einer geeigneten Validierungsmethode dargestellt.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Im Zuge der dynamischen und rasanten Entwicklung von Technologien in der heutigen Zeit stehen Unternehmen vor der Aufgabe, geeignete Technologien für die Stärkung der eigenen Wettbewerbsposition zu identifizieren. Einhergehend mit dieser Entwicklung steigt der Bedarf und Wunsch nach glaubwürdigen Verfahren zur Bewertung von Technologien, um dieser Aufgabe gerecht zu werden. Dies stellt die Validierung vor die Herausforderung, eine geeignete Methode für die Bewertung der Validität eines Verfahrens auszuwählen. Eine Möglichkeit, um dieser Herausforderung gerecht zu werden, ist eine intensive Analyse der Zusammenhänge von Verfahren zur Bewertung von Technologien und Methoden der Validierung. In dieser Arbeit wurde vor diesem Hintergrund ein Konzept entwickelt, um die Entscheidung für die Auswahl einer geeigneten Validierungsmethode für Technologiebewertungsverfahren zu unterstützen.

Für die Analyse der Zusammenhänge zwischen Methoden der Validierung und Technologiebewertungsverfahren, sind zunächst die Grundlagen im Bereich der Technologiebewertung und Validierung zu untersuchen. Zur Verdeutlichung der Herangehensweise bei der Technologiebewertung wurden zunächst die Ziele und Nutzen einer Technologiebewertung dargestellt (vgl. Abschnitt 2.1). Ein wesentliches Ziel der Technologiebewertung besteht darin eine geeignete Technologie für ein spezifisches Szenario, in der eine Technologie implementiert werden soll, zu identifizieren. Die Technologiebewertung bildet in diesem Kontext einen wesentlichen Teil des Managements von Technologien, um in verschiedenen Phasen der Planung und Strategie als Bewertungsgrundlage für das Treffen von strategischen Entscheidungen zu dienen (vgl. Abschnitt 2.2). Um diese Zielstellung zu erreichen, werden verschiedene Ansätze zur Technologiebewertung angewendet (vgl. Abschnitt 2.2). In diesem Kontext ist die Definition relevanter Kriterien für die Bewertung von Technologien von entscheidender Bedeutung, um die Eignung einer Technologie angemessen zu überprüfen (vgl. Abschnitt 2.3). Abschließend wurde die Technologiebewertung in der Batteriezellenfertigung betrachtet, um vorbereitend für die Konzeptentwicklung in Kapitel 4 ein Grundverständnis zu vermitteln. Um geeignete Validierungsmethoden für Technologiebewertungsverfahren auswählen zu können, wurden vorbereitend auf Kapitel 4 in Kapitel 3 die Grundlagen der Validierung betrachtet. Dazu zählen u. a. die Betrachtung von Standards und Kriterien von Validierung, die Beschreibung verschiedener Arten von Validierung sowie einer Erläuterung der wesentlichen Zusammenhänge zwischen Technologiebewertung und Validierung.

Basierend auf den Erkenntnissen aus den Grundlagen der Technologiebewertung und Validierung wurde das methodische Vorgehen in Kapitel 4 entwickelt. Anhand einer systematischen Literaturrecherche wurden in einem ersten Schritt für eine Validierung von Technologiebewertungsverfahren geeignete Validierungsmethoden identifiziert (vgl. Abschnitt 4.1). In Abschnitt 4.2 wurden die wesentlichen Eigenschaften sowie Vor- und Nachteile der als relevant erachteten Validierungsmethoden erläutert, um die Nachvollziehbarkeit der Konzeptentwicklung in Kapitel 6 zu unterstützen. Darüber hinaus wurden basierend auf ähnlichen Eigenschaften verschiedener Validierungsmethoden fünf Validierungsgruppen gebildet, um die

Einfachheit der Konzeptentwicklung zu fördern. Damit eine Verknüpfung zwischen Methoden der Validierung und Verfahren der Technologiebewertung hergestellt werden kann, wurde ein Ablaufschema in Kombination mit einem morphologischen Kasten als zweiter Schritt des methodischen Vorgehens gewählt (vgl. Abschnitt 4.1.). Diese sollen als Entscheidungsunterstützung dienen, um eine geeignete Validierungsmethode auswählen zu können. Für diesen Schritt wurden in Kapitel 5 Anforderungen und Randbedingungen an das Konzept formuliert, welche als Leitfaden und Rahmen für die Entwicklung des Konzepts dienen.

Auf dieser Grundlage wurde in Kapitel 6 zunächst ein Ablaufschema basierend auf literaturseitig abgeleiteten Schritten bei der Entwicklung eines Ablaufschemas sowie notwendigen Schritten bei der Auswahl einer geeigneten Validierungsmethode erarbeitet. Für die am wichtigsten identifizierten Schritte des Ablaufschemas wurde ein morphologischer Kasten als Entscheidungsunterstützung entwickelt (vgl. Abschnitt 6.2). Hierfür wurden die Erkenntnisse aus den Grundlagen (vgl. Kapitel 2 und Kapitel 3) in den Zusammenhang der Eigenschaften der Methoden der Validierung (vgl. Abschnitt 4.2) gestellt. Gestützt auf diesem Zusammenhang wurden die Abhängigkeiten zwischen Verfahren der Technologiebewertung und Methoden der Validierung ermittelt, um geeignete Attribute und Ausprägungen für den morphologischen Kasten zu erarbeiten (vgl. Abschnitt 6.2). Dafür wurde der morphologische Kasten in zwei Bestandteile geteilt. In einem ersten Schritt wurden die Ressourcenanforderungen der Validierungsgruppen hinsichtlich der Anwendung für die Validierung eines Technologiebewertung betrachtet (vgl. Unterabschnitt 6.2.1). Hierfür wurden die Eigenschaften der Validierungsgruppen untersucht. In einem zweiten Schritt wurden die wesentlichen Charakteristika von Technologiebewertungsverfahren aus den Grundlagen der Technologiebewertung abgeleitet, welche die Attribute und Ausprägungen bilden. Basierend darauf wurde die Eignung der Validierungsgruppen für die ermittelten Ausprägungen untersucht, um geeignete Validierungsgruppen für verschiedene Szenarien von Technologiebewertungsverfahren zu identifizieren. Abschnitt 6.3 führt die Erkenntnisse der vorherigen Abschnitte zusammen und stellt das Konzept in seiner Gänze dar.

Zur Überprüfung der Praktikabilität sowohl des Ablaufschemas als auch des morphologischen Kastens wurde die Entscheidungsunterstützung an einem Fallbeispiel eines Technologiebewertungsverfahrens für Produktionstechnologien angewendet (vgl. Kapitel 7). Durch die Anwendung der Entscheidungsunterstützung an einem Fallbeispiel konnten erste Einschätzungen über Stärken und Schwächen des Konzepts gewonnen werden (vgl. Abschnitt 7.2). Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass ein erster erfolgreicher Ansatz zur Auswahl einer geeigneten Validierungsmethoden entwickelt wurde, der einige kleine Schwächen aufweist. Die Diskussion und das Fazit in Abschnitt 7.3 zeigen zahlreiche Anknüpfungspunkte für weitere Untersuchungen und Anpassungen bei der Auswahl geeigneter Validierungsmethoden für Technologiebewertungsverfahren.

Aus dem Fazit lässt sich u. a. die Notwendigkeit ableiten, die Anwendbarkeit der Entscheidungsunterstützung an weiteren Technologiebewertungsverfahren zu untersuchen. Daraus können weitere Schlussfolgerungen gezogen werden, um die Entscheidungsunterstützung weiter zu verbessern. Ein mögliches Ziel wäre in diesem Kontext eine Modifizierung des

morphologischen Kastens, um die Genauigkeit der Entscheidungsunterstützung zu erhöhen. Dafür sind beispielsweise die Nachteile und Schwierigkeiten einzelner Attribute und Ausprägungen bei der Anwendung in der Praxis zu untersuchen. Basierend auf den Erkenntnissen durch die Anwendung an verschiedenen Technologiebewertungsverfahren können zudem Rückschlüsse über eine mögliche Erweiterung des morphologischen Kastens gezogen werden. Dadurch können Technologiebewertungsverfahren besser und vollständiger voneinander differenziert und die Genauigkeit der Auswahl einer Validierungsmethode erhöht werden. In diesem Zusammenhang wäre eine Einschätzung des Konzepts durch einen Experten in dem Themengebiet der Validierung oder Technologiebewertung interessant.

Ein weiterer Aspekt zur Erweiterung des Konzepts zur Auswahl geeigneter Validierungsmethoden für Technologiebewertungsverfahren, wäre die Ergänzung von weiteren Validierungsmethoden. Das entwickelte Konzept bildet nur einen Bereich der relevanten Validierungsmethoden für Technologiebewertungsverfahren ab. Denkbar wäre eine Überprüfung von weiteren Validierungsmethoden, die für die Anwendung der Entscheidungsunterstützung potentiell in Frage kommen. In diesem Kontext ist die Betrachtung spezifischer Validierungsmethoden innerhalb der gebildeten Validierungsgruppen eine mögliche Herangehensweise, um diese für die Attribute und Ausprägungen des morphologischen Kastens zu untersuchen. Hierfür wäre die Einschätzung durch einen Experten interessant.

Zur Reduzierung von repetitiver Arbeit bei der Anwendung der Entscheidungsunterstützung, kann eine Datenbank für einzelne Validierungsmethoden und den dazugehörigen Ausprägungen entwickelt werden. Ergänzend dazu kann zudem die Anwendung anhand verschiedener Technologiebewertungsverfahren dokumentiert werden, um die Anwendung für folgende Technologiebewertungsverfahren zu vereinfachen. Basierend darauf kann ein Tool entwickelt werden, um eine schnelle Auswahl einer geeigneten Validierungsmethode zu ermöglichen. Hierfür wäre die Entwicklung einer Excel-Tabelle denkbar, damit durch einfaches Anklicken verschiedener Ausprägungen des morphologischen Kastens eine Validierungsmethode ausgewählt werden kann.

Ein weiterer Ansatz zur Fortführung dieser Arbeit besteht darin, die erarbeiteten Schritte des Auswahlschemas zu verfeinern. Dies kann geschehen, indem mehr und feiner differenzierte Schritte abgeleitet werden. Das hat zur Folge, dass die gewählten Schritte möglicherweise angepasst oder innerhalb der gewählten Schritte weitere Schritte beschrieben werden müssen. In diesem Zusammenhang kann ein weiterer Auswahlschritt mit Fokus auf den Eigenschaften (z. B. Zuverlässigkeit der Validierung) der Validierungsmethoden dem Auswahl-schema hinzugefügt werden. Generell könnte die Erarbeitung eines detaillierteren Auswahlverfahrens in Erwägung gezogen werden, um die Präzision bei der Auswahl angemessener Validierungsmethoden für Technologiebewertungsverfahren zu steigern. Dies würde die Komplexität des Auswahlschemas erhöhen, die für die Auswahl einer geeigneten Validierungsmethode möglicherweise nicht angemessen ist.

Durch die Arbeit können einige Empfehlungen für die Weiterentwicklung einer Entscheidungsunterstützung abgegeben werden. Eine zuverlässige Bewertung des Konzepts ist erst nach weiteren Testanwendungen an Technologiebewertungsverfahren möglich. An einigen Stellen

Bedarf es an weiteren Untersuchungen, um ein konkretes Konzept ausarbeiten zu können. Dem Forschungsinstitut Fraunhofer FFB wird empfohlen, in den aufgezeigten Schwachstellen weitere Forschungen anzustreben. Aus den gesammelten Ergebnissen können wiederum Rückschlüsse gezogen werden.

Abschließend ist zu erwähnen, dass die Arbeit eher als Handlungsempfehlung für Unternehmen, in denen z. B. eigenständig entwickelte Technologiebewertungsverfahren angewendet werden oder die Datenlage fortschrittlicher ist, geeignet ist. Die Arbeit soll in der Zukunft dazu dienen, Rückschlüsse bezüglich eines Auswahlverfahrens von Validierungsmethoden für Technologiebewertungsverfahren zu ziehen

Literaturverzeichnis

- Alber, Sönke; Gassmann, Oliver (2005). Technologie- und Innovationsmanagement. In: Sönke Alber und Oliver Gassmann (Hg.): Handbuch Technologie- und Innovationsmanagement. Wiesbaden, Gabler Verlag, S. 3–21.
- Altman, Douglas G.; Royston, Patrick (2000). What do we mean by validating a prognostic model? In: *Statistics in Medicine* 19 (4), S. 453–473.
- Ang, Alfredo H.; Tang, Wilson H. (1975). Probability concepts in engineering planning and design. New York, Wiley.
- Balci, Osman (1997). Verification, Validation and Accreditation of Simulation Models. In: Sigrún Andradóttir, Kevin J. Healy, David H. Withers und B. L. Nelson (Hg.): Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference. 1997 Winter Simulation Conference. Atlanta, Georgia, USA, IEEE, S. 135–141.
- Balci, Osman (1998). Verification, Validation, and Testing. In: Jerry Banks (Hg.): Handbook of Simulation. Principles, Methodology, Advances, Applications and Practice. New York/Chichester/Weinheim, Wiley, S. 335–393.
- Balci, Osman; Nance, Richard E.; Arthur, James D. et al. (2002). Expanding Our Horizons in Verification, Validation, and Accreditation Research and Practice. In: Enver Yücesan, Chun-Hsien Chen, Jane L. Snowden und John M. Charnes (Hg.): Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference. 2002 Winter Simulation Conference. San Diego, Kalifornien, USA, IEEE, S. 653–663.
- Banta, David (2009). What is Technology Assessment? In: *International journal of technology assessment in health care* 25, S. 7–9.
- Bognar, Nicolas; Filz, Marc-André; Herrmann, Christoph et al. (2018). Assessment of Changeability in Battery Cell Production Systems. In: *Procedia CIRP* 72, S. 695–700.
- Borenstein, Denis (1998). Towards a Practical Method to validate Decision Support Systems. In: *Decision Support Systems* 23 (3), S. 227–239.
- Borsboom, Denny; Mellenbergh, Gideon J.; van Heerden, Jaap (2004). The Concept of Validity. In: *Psychological Review* 111 (4), S. 1061–1071.
- Brade, Dirk (2000). Enhancing Modeling and Simulation Accreditation by Structuring Verification and Validation Results. In: J. A. Joines, R. R. Barton, K. Kang, and P. A. Fishwick, eds. (Hg.): 2000 Winter Simulation Conference Proceedings. WSC 2000, Winter Simulation Conference. Orlando, FL, USA, 10-13 Dec. 2000, IEEE, S. 840–848.
- Brandkamp, Michael (2000). Technologien für innovative Unternehmensgründungen. Wiesbaden, Dt. Univ.-Verl.
- Brieke, Michael (2009). Erweiterte Wirtschaftlichkeitsrechnung in der Fabrikplanung. Garbsen, PZH Produktionstechnologie Zentrum.
- Brodbeck, Harald (1999). Strategische Entscheidungen im Technologie-Management. Zürich, Verlag Industrielle Organisation.
- Broekel, Tom (2007). Measuring Technological Complexity - Current approaches and a new Measure of Structural Complexity. Utrecht, arXiv.

- Brousseau, Emmanuel B.; Dimov, Stefan S.; Bigot, Samuel et al. (2009). Technology Maturity Assessment of Micro and Nano Manufacturing Processes. In: *4M/ICOMM - The Global Conference on Micro Manufacture* 24 (11), S. 257–262.
- Bullinger, Hans-Jörg (1996). *Technologiemanagement*. Berlin, Springer.
- Bullinger, Hans-Jörg; Renz, Karl-Christof (2005). Forschungs- und Entwicklungsstrategien. In: Sönke Alber und Oliver Gassmann (Hg.): *Handbuch Technologie- und Innovationsmanagement*. Wiesbaden, Gabler Verlag, S. 83–100.
- Cardoso, Rafael C.; Kourtis, Georgios; Dennis, Louise A. et al. (2021). A Review of Verification and Validation for Space Autonomous Systems. In: *Curr Robot Rep* 2 (3), S. 273–283.
- Carson, John S. (2002). Model Verification and Validation. In: Enver Yücesan, Chun-Hsien Chen, Jane L. Snowdon und John M. Charnes (Hg.): *Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference*. 2002 Winter Simulation Conference. San Diego, Kalifornien, USA, IEEE, S. 52–58.
- Carter, Stacy L.; Wheeler, John J. (2019). Social Validity and Ethics. In: Stacy L. Carter und John J. Wheeler (Hg.): *The Social Validity Manual*. London, Elsevier, S. 203–216.
- Chilcott, J.; Tappenden, P.; Rawdin, A. et al. (2010). Avoiding and Identifying Errors in Health Technology Assessment Models: Qualitative Study and Methodological Review. In: *Health technology assessment* 14 (25), S. 1–107.
- Cooper, Robert G. (2006). Managing Technology Development Projects. In: *Research-Technology Management* 49 (6), S. 23–31.
- Dahabreh, Issa J.; Chan, Jeffery A.; Earley, Amy et al. (2017). Modeling and Simulation in the Context of Health Technology Assessment: Review of Existing Guidance, Future Research Need, and Validity Assessment. Hg. v. AHRQ Publication, AHRQ, Rockville.
- Dallasega, Patrick; Woschank, Manuel; Sarkis, Joseph et al. (2022). Logistics 4.0 Measurement Model: Empirical Validation based on an International Survey. In: *IMDS* 122 (5), S. 1384–1409.
- Eddy, David M.; Hollingworth, William; Caro, J. Jaime et al. (2012). Model Transparency and Validation: A Report of the ISPOR-SMDM Modeling Good Research Practices Task Force--7. In: *Value in health : the journal of the International Society for Pharmacoeconomics and Outcomes Research* 15 (6), S. 843–850.
- Eker, Sibel; Rovenskaya, Elena; Langan, Simon et al. (2019). Model Validation: A Bibliometric Analysis of the Literature. In: *Environmental Modelling & Software* 117, S. 43–54.
- Engel, Dieter W.; Dalton, Andy C.; Anderson, Kirian. et al. (2012). Development of Technology Readiness Level (TRL) Metrics and Risk Measures. Pacific Northwest National Laboratory, USA.
- Ensmenger, Nathan (2016). The Multiple Meanings of a Flowchart. In: *Information & Culture* 51 (3), S. 321–351.
- ESA (2008). *TRL Handbook*. 6 Aufl., Hg. v. TEC-SHS, ESA, Noordwijk.
- Faidi, Safa; Olechowski, Alexander (2020). Identifying Gaps in Automation the Assessment of Technology Readiness Levels. In: *Proceedings of the Design Society: DESIGN Conference* 1, S. 551–558.

- Fallböhmer, Markus (2000). Generieren alternativer Technologieketten in frühen Phasen der Produktentwicklung. Aachen, Shaker.
- Ford, David; Ryan, Chris (1981). Taking Technology to Market. In: *Harvard business review: HBR* 59 (2), S. 117–126.
- Franceschini, Fiorenzo; Maisano, Domenico; Mastrogiacomo, Luca (2016). Empirical Analysis and Classification of Database Errors in Scopus and Web of Science. In: *Journal of Informetrics* 10 (4), S. 933–953.
- Freitag, Egon (2020). Kreativitätstechniken. Stuttgart, utb GmbH.
- Friedenthal, Sanford; Moore, Alan; Steiner, Rick (2008). A Practical Guide to SysML. Amsterdam, Elsevier Morgan Kaufmann OMG.
- GAO (2020). Technology Readiness Assessment Guide. Hg. v. GAO, U.S. Government Accountability Office, Washington.
- Gass, Saul I. (1983). Feature Article-Decision-Aiding Models: Validation, Assessment, and Related Issues for Policy Analysis. In: *Operations Research* 31 (4), S. 603–631.
- Gerberich, Thorsten (2011). Lean oder MES in der Automobilzulieferindustrie. Wiesbaden, Gabler Verlag / Springer Fachmedien GmbH.
- Gerpott, Torsten J. (2005). Strategisches Technologie- und Innovationsmanagement. 2., überarb. und erw. Aufl., Stuttgart, Schäffer-Poeschel.
- Gochermann, Josef (2020). Technologiemanagement. Wiesbaden, Heidelberg, Springer Gabler.
- Granig, Peter (2013). Innovationsstrategien. Dordrecht, Springer.
- Grunwald, Armin (2009). Technology Assessment: Concept and Methods. In: Anthonie Meijers und Dov M. Gabbay (Hg.): *Philosophy of technology and engineering sciences*. London, Elsevier, S. 1103–1146.
- Haag, Christoph; Schuh, Günther; Kreysa, Jennifer et al. (2010). Technologiebewertung. In: Günther Schuh und Sascha Klappert (Hg.): *Technologiemanagement. Handbuch Produktion und Management* 2. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, S. 309–363.
- Hall, Karl (2002). Ganzheitliche Technologiebewertung. Wiesbaden, Dt. Univ.-Verl.
- Heffernan, Roxanne; Wegerhoff, Daniel; Ward, Tony (2019). Dynamic risk factors: Conceptualization, measurement, and evidence. In: *Aggression and Violent Behavior* 48, S. 6–16.
- Heimes, Heiner Hans; Kampker, Achim; Lienemann, Christoph; Locke, Marc; Offermanns, Christian; Michaelis, Sarah; Rahimzei, Ehsan (2018). Lithium-Ion Battery Cell Production Process. Aachen, Frankfurt am Main, PEM der RWTH Aachen University; DVMA.
- Hennen, Leonhard; Peissl, Walter; Hahn, Julia et al. (2023). Introduction: Technology Assessment Beyond National Boundaries. In: Leonhard Hennen, Julia Hahn, Miltos Ladikas, Ralf Lindner, Walter Peissl und Quirinus Cornelis van Est (Hg.): *Technology Assessment in a Globalized World. Facing the challenges of transnational technology governance*. Cham, Springer International Publishing; Imprint Springer, S. 1–14.
- Hertz, Heinrich (1996). Die Prinzipien der Mechanik in neuem Zusammenhange dargestellt: drei Beiträge (1891-1894). 2. Aufl., Frankfurt am Main, geest & portig.

- Hildebrand, Knut; Gebauer, Marcus; Hinrichs, Holger; Mielke, Michael (2018). Daten- und Informationsqualität. 4. Aufl., Wiesbaden, Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Hofer, Andreas; Pemsel, Benedikt; Putz, Matthias (2021). Potenzialbasierte Bewertung innovativer Technologien in der Produktion. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 116 (5), S. 294–298.
- Hofer, Andreas; Schnell, Joscha; Beck, Benedict et al. (2019). Potential-based Technology Planning for Production Companies. In: *Procedia CIRP* 81, S. 1400–1405.
- Hofmann, Julia (2020). Ein Physiologiemodell für Tactical Combat Casualty Care Training in mobilen Serious Games. Dissertation. Universität der Bundeswehr München, München.
- Homann, Klaus (2005). Kommunales Rechnungswesen. 6., überarb. Aufl., Wiesbaden, Gabler Verlag.
- Huppel, Gjalte; Schaubroeck, Thomas (2022). Forecasting the Future Sustainability of Technology Choices: Qualitative Predictive Validity of Models as a Complement to Quantitative Uncertainty. In: *Front. Sustain.* 3, Artikel 629653.
- Ivarsson, Martin; Gorschek, Tony (2011). A Method for evaluating rigor and industrial Relevance of Technology Evaluations. In: *Empir Software Eng* 16 (3), S. 365–395.
- Kablitz, Caroline Désirée (2007). Dry coating - A Characterization and Optimization of an innovative Coating Technology. Dissertation. Universität Düsseldorf, Düsseldorf.
- Kane, Michael T. (2001). Current Concerns in Validity Theory. In: *J Educational Measurement* 38 (4), S. 319–342.
- Kaplan, Mark S.; Berthelot, Jean-Marie; Feeny, David et al. (2007). The Predictive Validity of Health-related Quality of Life Measures: Mortality in a Longitudinal Population-based Study. In: *Quality of life research : an international journal of quality of life aspects of treatment, care and rehabilitation* 16 (9), S. 1539–1546.
- Kaufmann, Traute (2021). Strategiewerkzeuge aus der Praxis. Berlin, Heidelberg, Springer.
- Kimberlin, Carole L.; Winterstein, Almut G. (2008). Validity and Reliability of Measurement Instruments used in Research. In: *American journal of health-system pharmacy : AJHP : official journal of the American Society of Health-System Pharmacists* 65 (23), S. 2276–2284.
- Kirchmair, Rolf (2022). Qualitative Forschungsmethoden. Berlin, Heidelberg, Springer.
- Klappert, Sascha; Schuh, Günther; Aghassi, Susanne (2010). Einleitung und Abgrenzung. In: Günther Schuh und Sascha Klappert (Hg.): *Technologiemanagement. Handbuch Produktion und Management* 2. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, S. 5–10.
- Klas, Michael; Bauer, Thomas; Dereani, Andreas et al. (2015). A Large-Scale Technology Evaluation Study: Effects of Model-based Analysis and Testing. In: Hongyu Zhang, Xin Xia und Lingming Zhang (Hg.): *2015 IEEE/ACM 37th IEEE International Conference on Software Engineering*. 2015 IEEE/ACM 37th IEEE International Conference on Software Engineering (ICSE). Florence, Italy, 16.05.2015 - 24.05.2015, IEEE, S. 119–128.
- Kotte, Silja (2017). Evaluationsforschung. In: Silja Kotte (Hg.): *Deutsch-israelisches Leadership Development*. Wiesbaden, Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 7–37.
- Krebs, Pascal (2012). Bewertung vernetzter Produktionsstandorte unter Berücksichtigung multidimensionaler Unsicherheiten. München, Utz.

- Kröll, Markus (2007). Methode zur Technologiebewertung für eine ergebnisorientierte Produktentwicklung. Heimsheim, Jost-Jetter-Verl.
- Landry, Maurice; Malouin, Jean-Louis; Oral, Muhittin (1983). Model Validation in Operations Research. In: *Operations Research* 14 (3), S. 207–220.
- Lane, Suzanne (2023). Validity, Fairness, and Technology-Based Assessment. In: Victoria Yaneva und Matthias von Davier (Hg.): *Advancing Natural Language Processing in Educational Assessment*. New York, Routledge, S. 127–141.
- Leeflang, Peter S.H.; Wieringa, Jaap E.; Bijmolt, Tio H.A. (2014). *Modeling Markets*. Berlin, Heidelberg, Springer.
- Lehmann, Axel; Wang, Zhongshi (2019). Verification, Validation, and Accreditation (VV&A)—Requirements, Standards, and Trends. In: Lin Zhang, Bernard P. Zeigler und Yuanjun Laili (Hg.): *Model Engineering for Simulation*, Elsevier, S. 101–121.
- Liu, Yangtao; Zhang, Ruihan; Wang, Jun et al. (2021). Current and Future Lithium-Ion Battery Manufacturing. In: *iScience* 24 (4), S. 102332.
- Mankins, John C. (1995). Technology Readiness Levels. NASA, Office of Space Access and Technology, Advanced Concepts Office, Washington.
- Mankins, John C. (2009). Technology Readiness Assessments: A Retrospective. In: *Acta Astronautica* 65 (9-10), S. 1216–1223.
- Mayer, David. G.; Butler, Dirk. G. (1993). Statistical Validation. In: *Ecological Modelling* 68 (1-2), S. 21–32.
- Maylor, Harvey R.; Turner, Neil W.; Murray-Webster, Ruth (2013). How Hard Can It Be?: Actively Managing Complexity in Technology Projects. In: *Research-Technology Management* 56 (4), S. 45–51.
- McCabe, Chris.; Dixon, Simon (2000). Testing the Validity of Cost-Effectiveness Models. In: *PharmacoEconomics* 17 (5), S. 501–513.
- Metze, Gerhard (2008). Technologie-Portfolio als Methodik der Inventions- und Innovationsbewertung - Prolegomena zu Metriken für Inventionen und Innovationen. In: Gerhard Metze, Wilhelm Schmeisser, Hermann Mohnkopf und Matthias Hartmann (Hg.): *Innovationserfolgsrechnung. Innovationsmanagement und Schutzrechtsbewertung, Technologieportfolio, Target-Costing, Investitionskalküle und Bilanzierung von FuE-Aktivitäten*. Berlin, Heidelberg, Springer, S. 325–345.
- Moll, Torsten; Schuh, Günther; Klappert, Sascha (2010). Ordnungsrahmen Technologiemanagement. In: Günther Schuh und Sascha Klappert (Hg.): *Technologiemanagement. Handbuch Produktion und Management* 2. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, S. 11–29.
- Moody, Daniel L.; Shanks, Graeme G. (2003). Improving the Quality of Data Models: Empirical Validation of a Quality Management Framework. In: *Information Systems* 28 (6), S. 619–650.
- NASA (2016). *NASA Systems Engineering Handbook SP-2016-6105*. 2 Aufl., Hg. v. NASA, NASA, Washington.
- Noh, Heeyong; Seo, Ju-Hwan; Sun Yoo, Hyoung et al. (2017). How to improve a Technology Evaluation Model: A data-driven approach. In: *Technovation* 72-73, S. 1–12.

- Orilski, Simon; Schuh, Günther; Klappert, Sascha (2010). Technologieplanung. In: Günther Schuh und Sascha Klappert (Hg.): *Technologiemanagement. Handbuch Produktion und Management* 2. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, S. 171–220.
- Oztemel, Ercan; Korkusuz Polat, Tulay (2006). Technology Readiness Model for Enterprises. In: Europäische Kommission und I*PROMS (Hg.): *Intelligent production machines and systems. 2nd I*PROMS Virtual Conference 3 - 14 July*. Amsterdam, Elsevier, S. 362–367.
- Peliti, Lorenz.; Vulpiani, Antonio. (Hg.) (1988). *Measures of Complexity*. Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg.
- Pfeiffer, Werner; Weiß, Erwin (1995). Methoden zur Analyse und Bewertung technologischer Alternativen. In: Erich Zahn (Hg.): *Handbuch Technologiemanagement*. Stuttgart, Schäffer-Poeschel Verlag, S. 663–681.
- Phillips, John L. (1997). *Statistisch gesehen*. Basel, Birkhäuser Basel.
- Powell, Kimberly R.; Peterson, Shenita R. (2017). Coverage and Quality: A comparison of Web of Science and Scopus databases for Reporting faculty nursing Publication Metrics. In: *Nursing outlook* 65 (5), S. 572–578.
- Quadri, Saadiq M. K.; Farooq, Sheikh Umar (2010). Software Testing – Goals, Principles, and Limitations. In: *IJCA* 6 (9), S. 7–10.
- Norm ISO 9000 (2015). *Quality Management Systems - Fundamentals and Vocabulary*. Online verfügbar unter http://www.qumsense.de/gesoeko/9000_2015.pdf, zuletzt geprüft am 22.01.2024.
- Qureshi, Mohamed E.; Harrison, Simon R.; Wegener, Michael K. (1999). Validation of multicriteria Analysis Models. In: *Agricultural Systems* 62 (2), S. 105–116.
- Rabe, Markus; Spieckermann, Sven; Wenzel, Sigrid (2008). *Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik*. Berlin, Heidelberg, Springer.
- Reinhart, Gunther; Schindler, Sebastian.; Krebs, Pascal (2011). Strategic Evaluation of Manufacturing Technologies. In: Jürgen Hesselbach (Hg.): *Glocalized solutions for sustainability in manufacturing. Proceedings of the 18th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering, Technische Universität Braunschweig, Braunschweig, Germany, May 2nd - 4th, 2011*. Berlin, Heidelberg, Springer, S. 179–184.
- Reminger, Brigitte (1990). *Expertensystem zur Unterstützung der strategischen Technologieplanung*. Berlin, Erich Schmidt.
- Rimpau, Christoph (2011). *Wissensbasierte Risikobewertung in der Angebotskalkulation für hochgradig individualisierte Produkte*. München, Utz.
- Rosenkranz, Friedrich; Missler-Behr, Magdalena (2005). *Unternehmensrisiken erkennen und managen*. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Sagasti, Francisco R.; Mitroff, Ian I. (1973). Operations Research from the Viewpoint of General Systems Theory. In: *Omega* 1 (6), S. 695–709.
- Sargent, Robert G. (1982). Verification and Validation of Simulation Models. In: François E. Cellier (Hg.): *Progress in Modelling and Simulation*. New York, Academic Press, S. 159–169.
- Sargent, Robert G. (2013). Verification and Validation of Simulation Models. In: *Journal of Simulation* 7 (1), S. 12–24.

- Sargent, Robert G. (2014). Verifying and Validating Simulation Models. In: Proceedings of the 2014 Winter Simulation Conference. Unter Mitarbeit von A. Tolk, Diallo, S. Y., Ryzhov, I. O., L. Yilmaz, S. Buckley und J. A. Miller. Proceedings of the 2014 Winter Simulation Conference. Piscataway, NJ, IEEE, S. 118–131.
- Schindler, Sebastian (2014). Strategische Planung von Technologieketten für die Produktion. Dissertation. Technische Universität München, München.
- Schönmann, Alexander; Dobler, Richard; Hofer, Andreas et al. (2018). Planung und Bewertung von Produktionstechnologien. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 113 (1), S. 7–11.
- Schubert, Johannes; Nollau, Sebastian; Schuh, Günther et al. (2010). Grundlagen zum Technologiemanagement. In: Günther Schuh und Sascha Klappert (Hg.): Technologiemanagement. Handbuch Produktion und Management 2. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, S. 33–53.
- Schuh, Günther; Klappert, Sascha (Hg.) (2010). Technologiemanagement. Handbuch Produktion und Management 2 2. Aufl., Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg (VDI-Buch).
- Schuh, Günther; Klappert, Sascha; Moll, Torsten (2007). Technologiemanagement - ein Kernprozess für Unternehmen. In: *ZWF* 102 (4), S. 186–189, zuletzt geprüft am 01.12.2023.
- Specht, Dieter; Mieke, Christian (2018). Technologiemanagement. Online verfügbar unter <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/technologiemanagement-50438#references>, zuletzt geprüft am 21.03.2024.
- Specht, Dieter; Möhrle, Martin G. (2002). Gabler Lexikon Technologie Management. Wiesbaden, Gabler Verlag.
- Speith, Stephan (2008). Vorausschau und Planung neuer Technologiepfade in Unternehmen: Ein ganzheitlicher Ansatz für das Strategische Technologiemanagement. Dissertation. Universität Kassel, Kassel.
- Straub, Jeremy (2015). In Search of Technology Readiness Level (TRL) 10. In: *Aerospace Science and Technology* 46, S. 312–320.
- VDI 3780 (2000). Technikbewertung - Begriffe und Grundlagen. Online verfügbar unter <https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdi-3780-technikbewertung-begriffe-und-grundlage>, zuletzt geprüft am 22.01.2024.
- Trommer, Gunnar (2001). Methodik zur konstruktionsbegleitenden Generierung und Bewertung alternativer Fertigungsfolgen. Aachen, Shaker.
- VDMA Batterieproduktion; PEM RWTH Aachen; Fraunhofer ISI et al. (2023). Roadmap Batterie-Produktionsmittel 2030. Hg. v. VDMA Batterieproduktion, Frankfurt am Main.
- Volkswagen AG (2023). Dry Coating als Game-Changer für die Zellfertigung. In: *J Oberfl Techn* 63 (8), S. 12–13.
- vom Brocke, Jan; Simons, Alexander; Niehaves, Bjoern et al. (2009). Reconstructing the Giant: On the importance of Rigour in Documenting the Literature search process. 161 Aufl., European Conference on Information Systems (ECIS), ECIS 2009 Proceedings.
- Wang, Zhongshi (2013). Selecting verification and validation techniques for simulation projects: A planning and tailoring strategy. In: Raymond R. Hill und Michael E. Kuhl (Hg.): 2013

- Winter Simulations Conference (WSC). Washington, DC, USA, 08.12.2013 - 11.12.2013, IEEE, S. 1233–1244.
- Wellensiek, Markus; Schuh, Günther; Hacker, Patrick A. et al. (2010). Technologiefrüherkennung. In: Günther Schuh und Sascha Klappert (Hg.): *Technologiemanagement. Handbuch Produktion und Management 2*. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, S. 89–165.
- Wieringa, Roel (2014). Empirical Research Methods for Technology Validation: Scaling up to Practice. In: *Journal of Systems and Software* 95, S. 19–31.
- Wöhe, Günter; Döring, Ulrich; Brösel, Gerrit (2016). *Einführung in die allgemeine Betriebswirtschaftslehre*. 26., überarb. und erw. Aufl., München, Verlag Franz Vahlen.
- Wojcicki, Margaret A.; Strooper, Paul (2007). An iterative Empirical Strategy for the Systematic Selection of a Combination of Verification and Validation Technologies. In: IEEE Computer Society (Hg.): *Fifth International Workshop on Software Quality 2007 (WoSQ 2007)*. Minneapolis, MN, S. 9–14.
- Wolfrum, Bernd (1991). *Strategisches Technologiemanagement*. Wiesbaden, Gabler.
- Yin, Chenggang; McKay, Alison (2018). Model Verification and Validation Strategies and Methods: An Application Case Study. In: Arun M. Bhaskar, Subhransu Sekhar Dash und Swagatam Das (Hg.): *Proceedings of ISCIIA 2018 and ITCA 2018*, Bd. 2-6. The 8th International Symposium on Computational Intelligence and Industrial Applications and The 12th China-Japan International Workshop on Information Technology and Control Applications. Tengzhou, China, 02-06.11.2018, S. 1–6.
- Yuan, Shanshan; Xu, Wei (2015). Establishment and Validation of a Sustainable Evaluation Model for Heat Metering Technology in China. In: *Energy and Buildings* 99, S. 153–161.
- Zahn, Erich (Hg.) (1995). *Handbuch Technologiemanagement*. Stuttgart, Schäffer-Poeschel Verlag.
- Zelewski, S. (1999). Grundlagen. In: Hans Corsten (Hg.): *Betriebswirtschaftslehre*. 3. Aufl. Wien, Oldenbourg, S. 1–126.
- Zimmermann, Hans-Jürgen; Angstenberger, Joachim; Lieven, Karl; Weber, Richard (Hg.) (1993). *Fuzzy Technologien. Prinzipien, Werkzeuge, Potentiale*. Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg.

Anhang

Anhang A: Literaturlauswertung Web of Science

Autor (Jahr)	Titel	Literaturart
Ali Afzali et al. (2013)	Model Performance Evaluation (Validation and Calibration) in Model-based Studies of Therapeutic Interventions for Cardiovascular Diseases	Zeitschriftenartikel
Alitok et al. (2021)	Verification and Validation Methods Selection Based on Goal-Oriented Categorization for Simulation	Zeitschriftenartikel
Carson (2002)	Model Verification and Validation	Zeitschriftenartikel
Chilcott et al. (2010)	Avoiding and identifying errors in health technology assessment models: qualitative study and methodological review	Konferenzprotokoll
Dahabreh (2017)	Modeling and Simulation in the Context of Health Technology Assessment: Review of Existing Guidance, Future Research Needs, and Validity Assessment	Konferenzprotokoll
Eddy et al. (2012)	Model Transparency and Validation: A Report of the ISPOR-SMDM Modeling Good Research Practices Task Force-7	Zeitschriftenartikel
Fan et al. (2019)	Technology Selection Based on EDAS Cross-Efficiency Evaluation Method	Zeitschriftenartikel
Gangemi et al. (2006)	Modelling Ontology Evaluation and Validation	Zeitschriftenartikel
Ivarsson et al. (2010)	A method for evaluating rigor and industrial relevance of technology evaluations	Zeitschriftenartikel
Lehmann et al. (2019)	Verification, Validation, and Accreditation (V&A)— Requirements, Standards, and Trends	Zeitschriftenartikel
Luckring et al. (2023)	Model validation hierarchies for connecting system design to modeling and simulation capabilities	Zeitschriftenartikel
Noh et al. (2018)	How to improve a technology evaluation model: A data-driven approach	Zeitschriftenartikel
Song et al. (2019)	A Case Study about Analysis on the Valuation of Construction Technology for the Future of National	Zeitschriftenartikel
Ten Broeke et al. (2020)	Mapping validity and validation in modelling for interdisciplinary research	Zeitschriftenartikel
Wieringa (2013)	Empirical research methods for technology validation: Scaling up to practice	Zeitschriftenartikel
Wojcicki (2007)	An Iterative Empirical Strategy for the Systematic Selection of a Combination of Verification and Validation Technologies	Zeitschriftenartikel
Yin et al. (2018)	Model Verification and Validation Strategies and Methods: An Application Case Study	Konferenzprotokoll
Yuan et al. (2015)	Establishment and validation of a sustainable evaluation model for heat metering technology in China	Zeitschriftenartikel

Ergebnisse der Literaturlauswertung

Autur (Jahr)	Titel	Validierungsmethoden
Ali Afzali et al. (2013)	Model Performance Evaluation (Validation and Calibration) in Model-based Studies of Therapeutic Interventions for Cardiovascular Diseases	Face Validation, Internal Validation, External Validation, Cross-model Validation
Alitnok et al. (2021)	Verification and Validation Methods Selection Based on Goal-Oriented Categorization for Simulation	Face Validation, Sensitivity Analysis, Reviews, Walkthroughs, Audit, Documentation Checking, Inference
Carson (2002)	Model Verification and Validation	Face Validation, Parameter Testing, Cross-model Validation
Chilcott et al. (2010)	Avoiding and identifying errors in health technology assessment models: qualitative study and methodological review	Face Validation, Experts, Internal Validation, External Validation, Model Comparison, Predictive Validation, Degenerate Testing, Extreme condition Testing, Pen and Paper Approach
Dahabreh (2017)	Modeling and Simulation in the Context of Health Technology Assessment: Review of Existing Guidance, Future Research Needs, and Validity Assessment	Face Validation, Internal Validation, External Validation, Cross-model Validation, Prospective and Predictive Validation
Eddy et al. (2012)	Model Transparency and Validation: A Report of the ISPOR-SMDM Modeling Good Research Practices Task Force-7	Face Validation, Cross-model Validation, External Validation, Predictive Validation
Ivarsson et al. (2010)	A method for evaluating rigor and industrial relevance of technology evaluations	Cross-model Validation, Conclusion Validation, Internal Validation, External Validation, Construct Validation
Noh et al. (2018)	How to improve a technology evaluation model: A data-driven approach	Statistical Techniques (data-driven) for Reference, Causality und Ontology
Ten Broeke et al. (2020)	Mapping validity and validation in modelling for interdisciplinary research	Structural Validation, Behavioral Validation, Measurement Validation, Internal Validation, External Validation
Wieringa (2013)	Empirical research methods for technology validation: Scaling up to practice	Conclusion Validation, Internal Validation, External Validation
Yin et al. (2018)	Model Verification and Validation Strategies and Methods: An Application Case Study	Cross-model Validation, Face Validation, Extreme condition Validation, Sensitivity Analysis, Turing Test
Yuan et al. (2015)	Establishment and validation of a sustainable evaluation model for heat metering technology in China	Measurement Validation, Statistical Validation, Cross-model Validation

Anhang B: Literatúrauswertung Google Scholar

Autor (Jahr)	Titel	Literaturart
Aiztrauta et al. (2013)	Validation of integrated acceptance and sustainability assessment methodology	Zeitschriftenartikel
Al-Emran (2021)	Is It Still Valid or Outdated? A Bibliometric Analysis of the Technology Acceptance Model and Its Applications From 2010 to 2020	Beitrag in Sammelbuch
Altman (2000)	What do we mean by validating a prognostic model?	Zeitschriftenartikel
Baker (1993)	Policy and Validity Prospects for Performance-Based Assessment	Zeitschriftenartikel
Balci (2004)	Quality assessment, verification, and validation of modeling and simulation applications	Zeitschriftenartikel
Bill (2017)	A framework for Simulation Validation & Verification Method Selection	Zeitschriftenartikel
Borenstein (1998)	Towards a practical method to validate decision support systems	Zeitschriftenartikel
Brade (2004)	A generalized process for the verification and validation of models and simulation results	Dissertation
Case (2000)	Feature modelling: a validation methodology and its evaluation	Zeitschriftenartikel
Cowles (2014)	Manufacturing technology support (Mates II)	Bericht
Curkovic (2003)	Environmentally Responsible Manufacturing: The development and validation of a measurement model	Zeitschriftenartikel
Dallasega (2022)	Logistics 4.0 measurement model: empirical validation based on an international survey	Zeitschriftenartikel
Bourguiba (2013)	Comprehensive Framework for the V&V of Decision Support System Design	Bericht
Dobrzańska-Danikiewicz (2010)	Foresight methods for technology validation, roadmapping and development in the surface engineering area	Zeitschriftenartikel
Donoso-Bravo (2011)	Model selection, identification and validation in anaerobic digestion: A review	Zeitschriftenartikel
Eker (2019)	Model validation: A bibliometric analysis of the literature	Zeitschriftenartikel
Fang (2020)	A Practical Approach to Model Validation	Zeitschriftenartikel
Frey (2006)	Validation of design methods: lessons from medicine	Zeitschriftenartikel

Autor (Jahr)	Titel	Literaturart
Gass (1993)	Decision-Aiding Models: Validation, Assessment, and Related Issues for Policy Analysis	Zeitschriftenartikel
Groesser (2012)	Contributions to model validation: hierarchy, process, and cessation	Zeitschriftenartikel
Halkidi (2001)	On Clustering Validation Techniques	Zeitschriftenartikel
Hao et al. (2023)	Computational study and experimental validation on the solubility of drugs in supercritical solvent for assessment of nanomedicine production via green technology for enhanced drug bioavailability	Zeitschriftenartikel
Huppel et al. (2022)	Forecasting the Future Sustainability of Technology Choices: Qualitative Predictive Validity of Models as a Complement to Quantitative Uncertainty	Zeitschriftenartikel
Hurtado-Romero (2020)	Innovative technologies for the production of food ingredients with prebiotic potential: Modifications, applications, and validation methods	Zeitschriftenartikel
Jiao (2018)	Technology enhanced innovative assessment	Monographie
Kalra (2011)	Method Development and Validation of Analytical Procedures	Beitrag in Sammelbuch
Katz (2017)	Validity Issues and Concerns for Technology based Performance Assessments	Beitrag in Sammelbuch
Kläs et al. (2015)	A Large-Scale Technology Evaluation Study: Effects of Model-based Analysis and Testing	Konferenzbeitrag
Kröll (2007)	Methode zur Technologiebewertung für eine ergebnisorientierte Produktentwicklung	Dissertation
Landry (1983)	Model validation in operations research	Zeitschriftenartikel
Marwedell (2023)	Embedded System Design	Monographie
Mayer (1993)	Statistical validation	Zeitschriftenartikel
McCabe (2000)	Testing the Validity of Cost-Effectiveness Models	Zeitschriftenartikel
Moody (2002)	Improving the quality of data models: empirical validation of a quality management framework	Zeitschriftenartikel
Moody (2003)	The Method Evaluation Model: A Theoretical Model for Validating Information Systems Design Methods	Konferenzprotokoll
Napitupulu (2017)	Validity Testing of Technology Acceptance Model Based on Factor Analysis Approach	Zeitschriftenartikel

Autor (Jahr)	Titel	Literaturart
O'Keefe (1993)	Expert System verification and validation: a survey and tutorial	Zeitschriftenartikel
Pace (2004)	Modeling and Simulation Verification and Validation Challenges	Zeitschriftenartikel
Qureshi (1999)	Validation of multicriteria analysis models	Zeitschriftenartikel
Saliccioli et al. (2016)	Sensitivity Analysis and Model Validation	Beitrag in Sammelbuch
Sargent (2000)	Validation and verification of simulation models	Zeitschriftenartikel
Schroeder et al. (2014)	The Impact of Pillar II Funding: Validation from a Modelling and Evaluation Perspective	Zeitschriftenartikel
Schuh (2010)	Technologiemanagement	Sammelbuch
Smith et al. (2008)	Sensitivity Analysis, a Powerful System Validation Technique	Zeitschriftenartikel
Tantithamthavorn et al. (2007)	An Empirical Comparison of Model Validation Techniques for Defect Prediction Models	Zeitschriftenartikel
Thacker et al. (2004)	Concepts of Model verification and validation	Bericht
Tiku (2009)	Validation of reliability capability evaluation model using a quantitative assessment process	Zeitschriftenartikel
Tracey (2007)	Design and development research: a model validation case	Zeitschriftenartikel
Vemer (2013)	Improving Model Validation in Health Technology Assessment: Comments on Guidelines of the ISPOR-SMDM Modeling Good Research Practices Task Force	Zeitschriftenartikel
Whitty (2014)	A Think Aloud Study Comparing the Validity and Acceptability of Discrete Choice and Best Worst Scaling Methods	Zeitschriftenartikel
Wieringa (2013)	Empirical research methods for technology validation: Scaling up to practice	Zeitschriftenartikel
Wools et al. (2019)	The Validity of Technology Enhanced Assessments—Threats and Opportunities	Beitrag in Sammelbuch
Yin (2013)	Validity and generalization in future case study evaluations	Zeitschriftenartikel
Yin (2018)	Model Verification and Validation Strategies and Methods: An Application Case Study	Zeitschriftenartikel

Ergebnisse der Literaturlauswertung

Autor (Jahr)	Titel	Validierungsmethode
Altman (2000)	What do we mean by validating a prognostic model?	Internal Validation, Temporal Validation, External Validation
Borenstein (1998)	Towards a practical method to validate decision support systems	Qualitative Validation, Face Validation, Subsystem Validation, Predictive Validation, Field test Validation, User Assessment
Cowles (2014)	Manufacturing technology support (Mates II)	Experimental Validation
Dallasega (2022)	Logistics 4.0 measurement model: empirical validation based on an international survey	Empirical Validation, Face Validation
Donoso-Bravo (2011)	Model selection, identification and validation in anaerobic digestion: A review	Direct Validation (Statistical Techniques & Mathematic Formulas), Cross-model Validation
Eker (2019)	Model validation: A bibliometric analysis of the literature	Statistical and Methodological Validation, Data-based Validation
Gass (1993)	Decision-Aiding Models: Validation, Assessment, and Related Issues for Policy Analysis	Face Validation or Expert Opinion, Variable-parameter Validation or Sensitivity Analysis, Hypothesis Validation
Huppel et al. (2022)	Forecasting the Future Sustainability of Technology Choices: Qualitative Predictive Validity of Models as a Complement to Quantitative Uncertainty	Evaluation Checklist of qualitative predictive Validation
Kläs et al. (2015)	A Large-Scale Technology Evaluation Study: Effects of Model-based Analysis and Testing	Cross-model Validation, Expert Opinion, External Validation, Internal Validation
Kröll (2007)	Methode zur Technologiebewertung für eine ergebnisorientierte Produktentwicklung	Validierung durch Anwendung (Experimental Validation), Expert Opinion
Landry (1983)	Model validation in operations research	Face Validation, Tracing, Internal Validation, Sensitivity Analysis, Historical Validation, Predictive Validation, Events Validation, Turing Tests, Spectral Analysis, Experimentation, Convergent Validation
Mayer (1993)	Statistical validation	Subjective Assessment, Visual Techniques, Deviance Measures, Statistical Tests
McCabe (2000)	Testing the Validity of Cost-Effectiveness Models	Expert Opinion, Predictive Validation, Cross-model Validation, Sensitivity Analysis (Uncertainty), Face Validation, Peer Review, Structural and Content Validation, Data-purpose Validation, Mathematical Correctness
Moody (2002)	Improving the quality of data models: empirical validation of a quality management framework	Data-validation (Validation of quality factors), Expert Opinion, Active seeking of disconfirming evidence, Participation, Use of multiple Cycles, Change of practice
Qureshi (1999)	Validation of multicriteria analysis models	Sensitivity Analysis, Predictive Validation, Face Validation, Turing Test, Cross-model Validation, Scope Validation, Statistical Techniques

Anhang C: Auflistung der Validierungsgruppen

Validierungsgruppen	
Datengetriebene Validierung	<p>Quellen: Carson (2002), Ten Broeke et al. (2020), Yuan et al. (2015), Noh et al. (2018), Yin et al. (2018), Eker (2019), Gass (1993), Landry (1983), Mayer (1993), McCabe (2000), Moody (2002), Qureshi (1999)</p> <p>Methoden: Measurement Validation, Cross Validation, Variable-Parameter Validation, Sensitivity Analysis and Statistical Techniques</p>
Interne Validierungsmethoden	<p>Quellen: Altman (2000), Borenstein (1998), Landry (1983), McCabe (2000), Chilcott et al. (2010), Dahabreh (2017), Eddy et al. (2012)</p> <p>Methoden: Structural and Construct Validation and Data-Driven Validation Methods</p>
Externe Validierungsmethoden	<p>Quellen: Ali Afzali et al. (2013), Dahabreh (2017), Eddy et al. (2012), Ivarsson et al. (2010), Yin et al. (2018), Yuan et al. (2015), Cowles (2014), Chilcott et al. (2010), Ten Broeke et al. (2020), Wieringa (2013), Altman (2000), Kläs et al. (2015), Qureshi (1999) (1999)</p> <p>Methoden: Cross-Model Validation, Empirical Validation and Experimental Validation</p>
Informelle Validierungsmethoden	<p>Quellen: Borenstein (1998), Gass (1993), Kläs et al. (2015), Kröll (2007), Landry (1983), Mayer (1993), McCabe (2000), Moody (2002), Qureshi (1999), Ali Afzali et al. (2013), Altinok et al. (2021), Carson (2002), Chilcott et al. (2010), Dahabreh (2017), Eddy et al. (2012), Yin et al. (2018)</p> <p>Methoden: Face Validation, Expert Opinion, User Assessment, Audit, (Peer-) Review and Documentation Checking</p>
Prädiktive Validierungsmethoden	<p>Quellen: Chilcott et al. (2010), Dahabreh (2017), Eddy et al. (2012), Altinok et al. (2021), Borenstein (1998), Gass (1993), Hupples et al. (2022), Landry (1983), McCabe (2000), Qureshi (1999)</p> <p>Methoden: Hypothesis Validation, Inference and qualitative predictive Validation</p>

Anhang D: Ausprägungen der Validierungsgruppen

Legende:

Vollständige Eignung
Geringere Eignung
Keine Eignung

Ausprägungen für den morphologischen Baukasten (Datengetriebene Validierungsmethoden)						
Attribut	- / 0 / +					
Ressourcen- einschätzung	Dateneinschätzung	-	0	+/+	+	
	Zeitliche Einschätzung	gering	moderat	hoch	hoch	
	Finanzielle Einschätzung	gering	moderat	hoch	hoch	
Charakteristika des Technologiebewertungsverfahrens	Zeitpunkt der Validierung	ex-ante	ex-post			
	Zielsetzung	Wirtschaftlich	Potential	Reifegrad	Technische Machbarkeit	
	Bewertungskriterien und -parameter	qualitativ	quantitativ	quantitativ	hybrid	
	Unsicherheit...	...in den Daten	...in den internen Annahmen	...durch externe Einflüsse	...in zukünftigen Entwicklungen	Keine Unsicherheiten
	Bewertungs- methode	qualitativ	quantitativ			
	Genauigkeit der Validierung	genau	ungenau			
	Komplexität	gering	moderat	hoch		

Kriterium	Attribute	Ausprägungen für den morphologischen Baukasten (Interne Validierungsmethoden)				
Ressourcen- einschätzung	Dateneinschätzung	-	-/0	0	0/+	+
	Zeitliche Einschätzung	gering		moderat		hoch
	Finanzielle Einschätzung	gering		moderat		hoch
Charakteristika des Technologiebewertungsverfahrens	Zeitpunkt der Validierung	ex-ante		ex-post		
	Zielsetzung	Wirtschaftlich	Potential	Reifegrad	Technische Machbarkeit	Ganzheitlich
	Bewertungskriterien und -parameter	qualitativ		quantitativ		hybrid
	Unsicherheit...	...in den Daten	...in den internen Annahmen	...durch externe Einflüsse	...in zukünftigen Entwicklungen	Keine Unsicherheiten
	Bewertungs- methode	qualitativ			quantitativ	
	Genauigkeit der Validierung	genau			ungenau	
	Komplexität	gering		moderat		hoch

Kriterium	Attribute	Ausprägungen für den morphologischen Baukasten (Externe Validierungsmethoden)				
Ressourcen- einschätzung	Dateneinschätzung	-	-/0	0	0/+	+
	Zeitliche Einschätzung	gering		moderat		hoch
	Finanzielle Einschätzung	gering		moderat		hoch
Charakteristika des Technologiebewertungsverfahrens	Zeitpunkt der Validierung	ex-ante		ex-post		
	Zielsetzung	Wirtschaftlich	Potential	Reifegrad	Technische Machbarkeit	Ganzheitlich
	Bewertungskriterien und -parameter	qualitativ		quantitativ		hybrid
	Unsicherheit...	...in den Daten	...in den internen Annahmen	...durch externe Einflüsse	...in zukünftigen Entwicklungen	Keine Unsicherheiten
	Bewertungs- methode	qualitativ		quantitativ		
	Genauigkeit der Validierung	genau		ungenau		
	Komplexität	gering	moderat		hoch	

Kriterium	Attribute	Ausprägungen für den morphologischen Baukasten (Informelle Validierungsmethoden)				
Ressourcen- einschätzung	Dateneinschätzung	-	-/0	0	0/+	+
	Zeitliche Einschätzung	gering		moderat		hoch
	Finanzielle Einschätzung	gering		moderat		hoch
Charakteristika des Technologiebewertungsverfahrens	Zeitpunkt der Validierung	ex-ante		ex-post		
	Zielsetzung	Wirtschaftlich	Potential	Reifegrad	Technische Machbarkeit	Ganzheitlich
	Bewertungskriterien und -parameter	qualitativ		quantitativ		hybrid
	Unsicherheit...	...in den Daten	...in den internen Annahmen	...durch externe Einflüsse	...in zukünftigen Entwicklungen	Keine Unsicherheiten
	Bewertungs- methode	qualitativ		quantitativ		
	Genauigkeit der Validierung	genau		ungenau		
	Komplexität	gering	moderat		hoch	

Kriterium	Attribute	Ausprägungen für den morphologischen Baukasten (Prädiktive Validierungsmethoden)				
Ressourcen- einschätzung	Dateneinschätzung	-	-/0	0	0/+	+
	Zeitliche Einschätzung	gering		moderat		hoch
	Finanzielle Einschätzung	gering		moderat		hoch
Charakteristika des Technologiebewertungsverfahrens	Zeitpunkt der Validierung	ex-ante				ex-post
	Zielsetzung	Wirtschaftlich	Potential	Reifegrad	Technische Machbarkeit	Ganzheitlich
	Bewertungskriterien und -parameter	qualitativ		quantitativ		hybrid
	Unsicherheit...	...in den Daten	...in den internen Annahmen	...durch externe Einflüsse	...in zukünftigen Entwicklungen	Keine Unsicherheiten
	Bewertungs- methode	qualitativ			quantitativ	
	Genauigkeit der Validierung	genau			ungenau	
	Komplexität	gering		moderat		hoch

Anhang E: Unterlagen zum Experteninterview

Fragebogen für das Experteninterview

- Wie lange sind Sie schon bei der Fraunhofer FFB tätig?
- In welchem Bereich sind Sie bei der Fraunhofer FFB tätig?
- Hatten Sie Berührungspunkte mit den Themen Validierung und Technologiebewertung?
- Haben Sie Kenntnisse von Methoden der Validierung?
- Wie bewerten Sie bei der Fraunhofer FFB die Validität von Technologiebewertung?
- Inwiefern sind Sie im Themengebiet der Trockenbeschichtungstechnologie als Experte involviert?
- Wie würden sie ihren Wissensstand bezüglich Trockenbeschichtungstechnologien bewerten?
- Wie schätzen Sie die interne Datenlage der Fraunhofer FFB bezüglich relevanter Daten zu Trockenbeschichtungstechnologien ein?
- Wie schätzen Sie die externe Datenlage bezüglich relevanter Daten zu Trockenbeschichtungstechnologien ein?
- Wie wichtig ist der Aspekt der Dauer der Validierung für Sie? Ist eine schnelle, eher ungenauere Validierung wünschenswerter als eine lange, genaue Validierung?
- Wie wichtig ist der finanzielle Einfluss auf die Auswahl einer Validierungsmethode? Spielt das eine große/untergeordnete Rolle?
- Wie wichtig ist Ihnen die Genauigkeit der Validierung eines Technologiebewertungsverfahrens?
- Welche Kriterien würden Sie bei dem Fragebogen von Schönmann et al. (2018) auswählen?

Einschätzung externe Datenlage

Kriterien	Bewertungsmetrik				
Existenz	-	-/o	o	o/+	+
Verfügbarkeit	-	-/o	o	o/+	+
Aktualität	-	-/o	o	o/+	+
Vollständigkeit	-	-/o	o	o/+	+
Verständlichkeit	-	-/o	o	o/+	+
Eindeutigkeit	-	-/o	o	o/+	+

Einschätzung interne Datenlage

Kriterien	Bewertungsmetrik				
Existenz	-	-/o	o	o/+	+
Verfügbarkeit	-	-/o	o	o/+	+
Aktualität	-	-/o	o	o/+	+
Vollständigkeit	-	-/o	o	o/+	+
Verständlichkeit	-	-/o	o	o/+	+
Eindeutigkeit	-	-/o	o	o/+	+