

## Christian Schneider

»Entscheidungsmodell für die Bestimmung optimaler Investitionsprogramme von Energieeffizienzmaßnahmen in der Fabrik«





**Christian Schneider**

»Entscheidungsmodell für die Bestimmung optimaler Investitionsprogramme von  
Energieeffizienzmaßnahmen in der Fabrik«

**Herausgeber**

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Bauernhansl<sup>1,2</sup>

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Kfm. Alexander Sauer<sup>1,3</sup>

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Kai Peter Birke<sup>4</sup>

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Marco Huber<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, Stuttgart

<sup>2</sup>Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb (IFF) der Universität Stuttgart

<sup>3</sup>Institut für Energieeffizienz in der Produktion (EEP) der Universität Stuttgart

<sup>4</sup>Institut für Photovoltaik (*ipv*) der Universität Stuttgart

**Kontaktadresse:**

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA  
Nobelstr. 12  
70569 Stuttgart  
Telefon 0711 970-1101  
info@ipa.fraunhofer.de  
www.ipa.fraunhofer.de

**Bibliographische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.de> abrufbar.

Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2023

**D 93**

2024

**Druck und Weiterverarbeitung:**

Fraunhofer Verlag, Mediendiensteleistungen, Stuttgart, 2024  
Für den Druck des Buches wurde chlor- und säurefreies Papier verwendet.



Dieses Werk steht, soweit nicht gesondert gekennzeichnet,  
unter folgender Creative-Commons-Lizenz:  
Namensnennung – Nicht kommerziell – Keine Bearbeitungen  
International 4.0 (CC BY-NC-ND 4.0).

# **Entscheidungsmodell für die Bestimmung optimaler Investitionsprogramme von Energieeffizienzmaßnahmen in der Fabrik**

**Von der Fakultät IV – Energie-, Verfahrens- und Biotechnik  
der Universität Stuttgart  
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigte Abhandlung**

**Vorgelegt von**

**Christian Schneider  
aus Dinkelsbühl**

Hauptberichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Kfm. Alexander Sauer

Mitberichter: Univ.-Prof. Prof. Dr. Martin K. Patel

Tag der mündlichen Prüfung: 19.12.2023

Institut für Energieeffizienz in der Produktion  
der Universität Stuttgart

2024



# Kurzfassung

Im Zuge einer möglichst zügigen Reduzierung der Treibhausgasemissionen kommt der Energieeffizienz in der Industrie eine gewichtige Rolle zu. Autoren sehen begrenzte Fortschritte in der Energieeffizienz eng verknüpft mit dem begrenzt rationalen Verhalten der beteiligten Akteure. Entscheidungen in der Energieeffizienz werden demnach oftmals basierend auf unvollständigen Informationen getroffen, da die Sammlung von Informationen Beschränkungen unterworfen ist und zudem nur eine begrenzte Anzahl an Alternativen geprüft wird. An diesem Punkt zeichnet sich ein Spannungsfeld zwischen Entscheidungstheorie und industrieller Energieeffizienz ab.

Die formulierte Zielsetzung des Forschungsvorhabens basiert auf der These, dass Entscheidungsträger in der Fabrik durch ein Entscheidungsmodell in ihrer rationalen Entscheidungsfindung unterstützt werden können. Die entstehenden Herausforderungen sind in ihrer Komplexität von den Entscheidern nicht mehr überblickbar und aufgrund der eingeschränkten Rationalität von menschlichen Entscheidungen nur in seltenen Fällen im mathematischen Sinne optimal.

Im Fokus der Arbeit steht die Entwicklung eines Entscheidungsmodells für die Bestimmung optimaler Investitionsprogramme von Energieeffizienzmaßnahmen in der Fabrik. Mithilfe des entwickelten Artefakts kann der optimale Investitionsplan für Energieeffizienzmaßnahmen unter Einbeziehung weiterer Nebenbedingungen ermittelt werden. Zudem können unterschiedliche Gewichtungen der Zieldimensionen durch den Entscheidenden berücksichtigt werden und durch eine integrierte Monte-Carlo-Simulation ermittelte Investitionsprogramme umfassend analysiert werden. Im Rahmen von zwei Fallbeispielen wird der Nutzen des entwickelten Entscheidungsmodells validiert.

In Summe werden bestehende Hemmnisse in der Energieeffizienz abgebaut und hierdurch ein Beitrag zur weiteren Steigerung der industriellen Energieeffizienz geleistet. Das Entscheidungsmodell ermöglicht es, die optimalen Investitionsprogramme unter Einbeziehung weiterer Nebenbedingungen zu ermitteln.





# Abstract

In the course of reducing greenhouse gas emissions as quickly as possible, however, energy efficiency in industry has an important role to play. Authors see limited progress in energy efficiency closely linked to the limited rational behavior of the actors involved. Accordingly, decisions in energy efficiency are often made on the basis of incomplete information, as the collection of information is subject to limitations and, in addition, only a limited number of alternatives are examined. At this point, a tension between decision theory and industrial energy efficiency emerges.

The formulated objective of the research project is based on the thesis that decision makers in the factory can be supported in their rational decision making by a decision model. The arising challenges are in their complexity unmanageable by the decision makers and due to the limited rationality of human decisions only in rare cases optimal in a mathematical sense.

The focus of this work is the development of a decision model for the determination of optimal investment programs of energy efficiency measures in factories. With the help of the developed artifact, the optimal investment plan for energy efficiency measures can be determined with the inclusion of additional constraints. In addition, different weightings of the target dimensions by the decision maker can be taken into account and investment programs determined by an integrated Monte Carlo simulation can be analyzed comprehensively. In the context of two case studies the benefit of the developed decision model is validated

In sum, existing barriers to energy efficiency are reduced, thereby contributing to a further increase in industrial energy efficiency. The decision model makes it possible to determine the optimal investment programs under consideration of further constraints.



# Vorwort des Autors

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA sowie dem Institut für Energieeffizienz in der Produktion der Universität Stuttgart.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Kfm. Alexander Sauer, dem Leiter des Instituts für Energieeffizienz in der Produktion (EEP) der Universität Stuttgart, für die Betreuung und wertvollen Fachgespräche. Allen meinen aktuellen und ehemaligen Kollegen am Fraunhofer IPA möchte ich Dank aussprechen für die Unterstützung und die Motivation. Namentlich erwähnt sei insbesondere Alexander Emde, mit dem ich gemeinsam das Projekt Promotion begonnen und dieses in unzähligen Diskussionen gemeinsam vorangetrieben habe. Großen Dank möchte ich ebenso an die Kolleginnen der IPA-Bibliothek für ihre kompetente Unterstützung bei der Literaturrecherche richten.

Herzlich bedanken möchte ich mich bei meinen Eltern, die durch ihre unermüdliche und liebevolle Unterstützung bei meiner Ausbildung den Grundstein für diese Arbeit gelegt haben, meiner Lebensgefährtin Lisa-Maria für die zeitliche und moralische Unterstützung und den Ansporn sowie meinem guten Freund Florian Kacheleck für viele gemeinsame Wanderungen und Weinabende, die mir auch in anstrengenden Zeiten neue Kraft für das Projekt Dissertation geschenkt haben.

Stuttgart, 4. April 2023

Christian Schneider



# Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis .....	xv
Symbolverzeichnis.....	xvii
Abbildungsverzeichnis .....	xx
Tabellenverzeichnis.....	xxiv
1. Einleitung .....	1
1.1. Ausgangssituation.....	1
1.2. Problemstellung .....	4
1.3. Zielsetzung und Forschungsfrage.....	6
1.4. Wissenschaftstheoretische Positionierung und Forschungsmethode .....	8
1.5. Struktur der Arbeit .....	13
2. Grundlagen .....	16
2.1. Beschreibungsmodell Fabrik .....	16
2.1.1. Definitionen.....	16
2.1.2. Ziele.....	18
2.1.3. Lebenszyklus.....	20
2.1.4. Systemebenen.....	20
2.2. Unternehmens- und Investitionsplanung.....	22
2.2.1. Unternehmens- und Fabrikplanung.....	22
2.2.2. Investitionsplanung .....	25
2.2.3. Investitionsbewertung und -rechnung.....	26
2.2.4. Praxis in der Investitionsbewertung von Energieeffizienzmaßnahmen .....	36
2.3. Entscheidungstheorie .....	37

---

2.3.1. Rationalität.....	38
2.3.2. Entscheidungsmodelle.....	41
2.3.3. Klassifikation.....	44
2.3.4. Ziele und Präferenzen.....	46
2.3.5. Mehrzielentscheidungen.....	49
2.3.6. Operations Research.....	67
2.4. Energieeffizienz in der Fabrik.....	70
2.4.1. Treiber und Hemmnisse.....	71
2.4.2. Maßnahmen.....	75
2.4.3. Entscheidungsprozesse.....	78
2.5. Risikomanagement.....	81
2.5.1. Prozess des Risikomanagements.....	82
2.5.2. Risikobewertung.....	84
2.6. Zusammenfassung und Zwischenfazit.....	89
3. Stand der Technik und der Wissenschaft.....	91
3.1. Methodisches Vorgehen.....	91
3.2. Vorstellung betrachteter Ansätze.....	93
3.2.1. Optimierte Auswahl von Energieeffizienzmaßnahmen.....	93
3.2.2. Modellierung und Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen.....	105
3.2.3. Risikobewertung von Energieeffizienzmaßnahmen.....	110
3.3. Zusammenfassung und Zwischenfazit.....	114
4. Reflexion des Stands der Technik und der Wissenschaft.....	116
4.1. Definition des Gegenstandsbereichs.....	116
4.2. Ableitung der Anforderungen.....	118

---

4.2.1. Anforderungen an das Entscheidungsmodell .....	119
4.2.2. Anforderungen an die Maßnahmenbewertung .....	120
4.2.3. Anforderung an die Risikobewertung.....	121
4.3. Einordnung der betrachteten Ansätze.....	121
4.4. Zusammenfassung des Handlungsbedarfs.....	129
5. Entwicklung des Entscheidungsmodells.....	132
5.1. Methodisches Vorgehen.....	132
5.2. Problemklassifizierung und -formulierung.....	134
5.2.1. Problemklassifizierung.....	135
5.2.2. Problemformulierung.....	138
5.3. Entwicklung des Zielsystems und Bestimmung der Zielgewichte .....	140
5.3.1. Entwicklung des Zielsystems .....	141
5.3.2. Bestimmung der Zielgewichte .....	144
5.4. Bewertungsmodell für Energieeffizienzmaßnahmen.....	147
5.4.1. Ökonomische und ökologische Bewertung .....	147
5.4.2. Wechselwirkungsbewertung.....	148
5.4.3. Bewertung des Umsetzungsaufwands.....	153
5.4.4. Risikobewertung.....	154
5.4.5. Bewertung nichtenergetischer Vorteile.....	162
5.4.6. Bewertungssystem.....	163
5.5. Auswahl relevanter Nebenbedingungen .....	166
5.6. Ableitung der Entscheidungsregeln.....	168
5.7. Monte-Carlo-Simulation .....	171
5.8. Entscheidungsvisualisierung.....	177

---

5.8. Zusammenfassung und Zwischenfazit .....	183
6. Implementierung und Validierung.....	184
6.1. Methodisches Vorgehen .....	184
6.2. Implementierung .....	185
6.3. Anwendungsübergreifende Modelluntersuchung.....	186
6.3.1. Analyse der Zielgewichtung.....	186
6.3.2. Analyse der Lösungsqualität .....	189
6.3.3. Analyse der Maßnahmenauswahl.....	191
6.3.4. Analyse Wechselwirkungsbewertung .....	193
6.4. Anwendung des Entscheidungsmodells.....	195
6.4.1. Fallbeispiel 1.....	196
6.4.2. Fallbeispiel 2.....	222
6.5. Bewertung der Erfüllung der Anforderungen .....	244
6.5.1. Anforderungen an das Entscheidungsmodell .....	244
6.5.2. Anforderungen an die Maßnahmenbewertung.....	245
6.5.3. Anforderung an die Risikobewertung von Energieeffizienzmaßnahmen ...	247
6.5.4. Zwischenfazit.....	247
6.6. Zusammenfassung.....	249
7. Reflexion, Zusammenfassung und Ausblick.....	250
7.1. Beantwortung der Forschungsfragen .....	250
7.2. Zusammenfassung und Ausblick .....	251
8. Literaturverzeichnis.....	255
9. Anhang.....	286



# Abkürzungsverzeichnis

<b>AfA</b>	Absetzung für Abnutzung
<b>AHP</b>	Analytischer Hierarchieprozess
<b>BAFA</b>	Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle
<b>Bpsw.</b>	Beispielsweise
<b>Bzgl.</b>	Bezüglich
<b>Bzw.</b>	Beziehungsweise
<b>DIN</b>	Deutsches Institut für Normung e. V.
<b>DSRM</b>	Design science research methodology
<b>EEA</b>	European Environment Agency
<b>ELECTRE</b>	Élimination Et Choix Traduisant la REalité
<b>EMAS</b>	Eco Management and Audit Scheme
<b>EMS</b>	Energiemanagement und Energiemanagementsysteme
<b>EN</b>	Europäische Norm
<b>et al.</b>	et alii (und andere)
<b>GA</b>	Genetischer Algorithmus
<b>GIS</b>	Geografisches Informationssystem
<b>IEA</b>	Internationale Energieagentur
<b>IPCC</b>	Intergovernmental Panel on Climate Change
<b>ISO</b>	International Standardisation Organisation
<b>KMU</b>	Kleine und mittlere Unternehmen
<b>KVP</b>	kontinuierlicher Verbesserungsprozess
<b>MADM</b>	Multi Attribute Decision Making
<b>MCDA</b>	Multi-Criteria Decision Analysis
<b>MODM</b>	Multi-Objective Decision Making
<b>NGO</b>	Nichtregierungsorganisation

<b>NSGA-II</b>	Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II
<b>OR</b>	Operations Research
<b>PSO</b>	Partikelschwarmoptimierung
<b>TOPSIS</b>	Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution
<b>VaR</b>	Value at Risk
<b>VDI</b>	Verein Deutscher Ingenieure

# Symbolverzeichnis

<b>Symbol</b>	<b>Beschreibung</b>
$A$	Aktionsraum
$A_{fuzzy}$	Unschärfe Menge
$A_H$	Höhe der Anschaffungsauszahlung
$A_{0j}$	Initiale Investitionshöhe des Investitionsobjekts $j$
$A^+$	Bestmögliche Alternative
$A^-$	Schlechtestmögliche Alternative
$a_a$	Beliebige Alternative aus der Menge $A$
$a_{jt}$	Höhe der laufenden Auszahlung des Investitionsobjekts $j$ in der Periode $t$
$b_i$	Flächenschwerpunkt der Zugehörigkeitsfunktion $i$
$C_j$	Kriterium $j$
$C_{i^+}$	Abstandsindex für die relative Nähe zur bestmöglichen Alternative
$c_j$	Kapitalwert Investitionsobjekt $j$
$d_{ij}$	Ausprägungen der Alternativen $A$ für ein Kriterium $C$
$d_{it}$	Nettozahlung je Einheit des Finanzierungsobjekts $i$ im Zeitpunkt $t$
$e_t$	Höhe der laufenden Einzahlung der Periode $t$
$E(x)$	Erwartungswert
$\bar{F}$	Obere Schranke
$\underline{F}$	Untere Schranke
$F^{-1}$	Umkehrfunktion
$g_v$	Nebenbedingungsungleichung
$h_u$	Nebenbedingungsungleichung
$i$	Höhe des Kalkulationszinssatzes

---

$M$	Menge der Energieeffizienzmaßnahmen
$m_i$	Energieeffizienzmaßnahme $i$
$n_{ik}$	Teilnutzenwert der Alternative $i$ bezüglich des Kriteriums $k$
$N_A$	Anzahl der zur Verfügung stehenden Aktionen
$N_S$	Anzahl der Umweltzustände
$n$	Länge der Nutzungsdauer
$P_i$	Teilproblem
$P'_i$	Relaxation von $P_i$
$P_o$	Ausgangsproblem
$Q$	Menge der Zielgewichte
$q_{ij}$	Gewichtungsfaktor $j$ der Stufe $k$
$R$	Entscheidungsmatrix
$R_k$	Region $k$
$T$	Länge der Nutzungsdauer
$t$	Zeitindex
$S$	Zustandsraum
$S_{i+}$	Abstandsmaß zur bestmöglichen Alternative
$S_{i-}$	Abstandsmaß zur schlechtestmöglichen Alternative
$S\ddot{A}$	Sicherheitsäquivalent
$T$	Letzter Zeitpunkt, in dem Zahlungen anfallen
$U$	Wertfunktion
$u$	Nutzen
$u_k$	Partielle Nutzenwerte der Zielkriterien $Z_k$
$V$	Paarvergleichsmatrix
$v_{ik}$	Matrixelemente der Paarvergleichsmatrix $V$
$w$	Eigenvektor
$w_k$	Gewichtung des Kriteriums $k$
$X_{e,i}$	Veränderung der Energiepreise für Jahr $i$ und Energieträger $e$

---

$X_{e,i,r}$	Regionenspezifische Veränderung der Energiepreise für Jahr $i$ , Energieträger $e$ und Region $r$
$X_{e,i,R\ddot{U}}$	Regionenübergreifende Veränderung der Energiepreise für Jahr $i$ und Energieträger $e$
$x_a$	Ergebnis bei Wahl einer Alternative $a_a$
$x_j$	Binäre Entscheidungsvariable
$z(x)$	Reellwertige Zielfunktion
$Z_{a1}$	Wert der Zielgröße $Z_z$ bei der Wahl der Alternative $A_a$
$\lambda$	Eigenwert
$\mu_A$	Zugehörigkeitsfunktion
$\Phi(a)$	Präferenzfunktion



# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Fortschritte der EU bei Klima- und Energiezielen .....	3
Abbildung 2: Zusammenfassung von Problemstellung und Zielsetzung .....	7
Abbildung 3: Forschungsansatz.....	12
Abbildung 4: Struktur der Arbeit.....	15
Abbildung 5: Systemebenen der Fabrik .....	22
Abbildung 6: Allgemeiner Planungsprozess .....	24
Abbildung 7: Vorgehensweise Investitionsplanung .....	26
Abbildung 8: Überblick über Investitionsverfahren bei sicherer Erwartung .....	28
Abbildung 9: Basiselemente eines Entscheidungsmodells.....	43
Abbildung 10: Kategorisierung von Entscheidungen.....	45
Abbildung 11: Allgemeiner Aufbau von Nutzwertmodellen .....	55
Abbildung 12: Grundsätzliches Vorgehen zur Beurteilung von Investitionsalternativen .....	56
Abbildung 13: Exemplarische AHP-Prioritäten.....	61
Abbildung 14: Exemplarische Zugehörigkeitsfunktion.....	65
Abbildung 15: Exemplarischer Lösungsbaum.....	69
Abbildung 16: Wahrgenommene Hemmnisse in der deutschen Industrie .....	74
Abbildung 17: Framework für die Kategorisierung nichtenergetischer Vorteile.....	78
Abbildung 18: Prozessmodell des Entscheidungsverhaltens .....	79
Abbildung 19: Risikomanagementprozess nach ISO 31000.....	84
Abbildung 20: Risikobewertungsmethoden .....	85

---

Abbildung 21: Risikoabhängigkeitsstruktur .....	87
Abbildung 22: Vorgehen zur Sichtung des Stands der Technik und der Wissenschaft .....	92
Abbildung 23: Drei Dimensionen der Wettbewerbsvorteile der Energieeffizienz .....	106
Abbildung 24: Aufgespannter Gegenstandsbereich des Entscheidungsmodells.....	118
Abbildung 25: Bewertung der Ansätze zur optimierten Auswahl von Energieeffizienzmaßnahmen (1 von 2) .....	124
Abbildung 26: Bewertung der Ansätze zur optimierten Auswahl von Energieeffizienzmaßnahmen (2 von 2) .....	125
Abbildung 27: Bewertung der Ansätze zur Bewertung und Modellierung von Energieeffizienzmaßnahmen .....	126
Abbildung 28: Bewertung der Ansätze zur Risikobewertung von Energieeffizienzmaßnahmen .....	128
Abbildung 29: Strukturierung der Anforderungen an das Entscheidungsmodell für die optimierte Auswahl von Energieeffizienzmaßnahmen in der Fabrik.....	131
Abbildung 30: Methodisches Vorgehen .....	134
Abbildung 31: Entscheidungsmodell für die Bestimmung optimaler Investitionsprogramme für Energieeffizienzmaßnahmen in der Fabrik .....	140
Abbildung 32: Zielsystem für Investitionsprogramme von Energieeffizienzmaßnahmen .....	143
Abbildung 33: Vorgehen Wechselwirkungsbewertung.....	149
Abbildung 34: Vorgehen quantitative Wechselwirkungsbewertung.....	153
Abbildung 35: Beurteilung von Risiken .....	156
Abbildung 36: Betrachtete Risikoarten.....	157
Abbildung 37: Konzept der Risikobewertung.....	158
Abbildung 38: Qualitative Risikobewertung .....	159



---

Abbildung 39: Zugehörigkeitsfunktion Fuzzy-Logik .....	160
Abbildung 40: Vorgehen Bewertung nichtenergetischer Vorteile .....	163
Abbildung 41: Ableitung betrachteter Nebenbedingungen.....	166
Abbildung 42: Konzept Monte-Carlo-Simulation.....	172
Abbildung 43: Simulationsmodule Investitionshöhe und Energieeinsparung.....	173
Abbildung 44: Simulationslauf der regionenspezifischen Energiepreisentwicklung ..	175
Abbildung 45: Simulationsmodul der jährlichen Kosteneinsparung .....	176
Abbildung 46: Entscheidungsunterstützung Auswahl Investitionsprogramm .....	179
Abbildung 47: Analyse Abweichung Zielkriterien um Referenzwert.....	180
Abbildung 48: Entscheidungsunterstützung Analyse Investitionsprogramm .....	182
Abbildung 49: Methodisches Vorgehen der Implementierung und Validierung .....	185
Abbildung 50: Analyse der Zielgewichtung mit erzielbarem Kapitalwert als Zielgröße .....	187
Abbildung 51: Qualitative Modellierung von Entscheidern.....	188
Abbildung 52: Abhängigkeit des erzielbaren Kapitalwert und des Risikos .....	189
Abbildung 53: Analyse der Lösungsqualität in verschiedenen Szenarien. (Gewichtungsvektor: umsetzungsbezogene Ziele, ökonomische Ziele, ökologische Ziele).....	191
Abbildung 54: Entscheidungsvorlage Fallbeispiel 1 .....	204
Abbildung 55: Abweichung um Referenzwert 1,5°Millionen Euro (ohne Nebenbedingung) .....	205
Abbildung 56: Entscheidungsvorlage mit begrenztem Anteil Deutschland .....	209
Abbildung 57: Abweichung um Referenzwert 1,5°Millionen Euro (inkl. Nebenbedingung) .....	210
Abbildung 58: Variation Diskontierungszins bei verschiedenen Investitionshöhen....	212

---

Abbildung 59: Entscheidungsanalyse Fallbeispiel 1 .....	215
Abbildung 60: Entscheidungsanalyse regionale Differenzierung .....	218
Abbildung 61: Boxplots Monte-Carlo-Simulationen Szenarien 1–4 (je n=1000) .....	221
Abbildung 62: Entscheidungsvorlage Fallbeispiel 2.....	230
Abbildung 63: Abweichung um Referenzwert 3,5°Millionen Euro (ohne Nebenbedingung).....	231
Abbildung 64: Entscheidungsvorlage mit Nebenbedingung „Wärme“ Fallbeispiel 2	233
Abbildung 65: Abweichung um Referenzwert 3,5°Millionen Euro mit Nebenbedingung .....	234
Abbildung 66: Amortisationszeit >80 % der Maßnahmen aus Wärmebereich umgesetzt (Nebenbedingung rot, keine Nebenbedingung blau) .....	236
Abbildung 67: Variation Diskontierungszins bei verschiedenen Investitionshöhen Fallbeispiel 2 .....	237
Abbildung 68: Monte-Carlo-Simulation .....	241
Abbildung 69: Boxplots Monte-Carlo-Simulationen Szenarien 1 – 4 (n=1000).....	243
Abbildung 70: Erfüllung der Anforderungen an das Artefakt .....	248

# Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Neun-Punkte-Skala von Saaty .....	57
Tabelle 2: Random-Index-Werte .....	60
Tabelle 3: Exemplarische Fuzzy-Interferenz .....	66
Tabelle 4: Kategorien von Energieeffizienzmaßnahmen .....	76
Tabelle 5: Exemplarische Risikomatrix .....	86
Tabelle 6: Beispiele für Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen .....	89
Tabelle 7: In der Literatur genannte unternehmerische Nebenbedingungen .....	123
Tabelle 8: Klassifizierung des Entscheidungsmodells .....	137
Tabelle 9: Neun-Punkte-Skala von Saaty .....	144
Tabelle 10: Zieltabelle .....	145
Tabelle 11: Exemplarische Zieltabelle .....	145
Tabelle 12: Prioritätsgewichtung .....	146
Tabelle 13: Exemplarische Wechselwirkungsmatrix .....	150
Tabelle 14: Bewertung des Umsetzungsaufwands .....	154
Tabelle 15: Parameter der Zugehörigkeitsfunktion .....	159
Tabelle 16: Exemplarische Konklusionen für zwei Risikoarten .....	161
Tabelle 17: Zieldimensionen und Bewertungskriterien .....	165
Tabelle 18: Auswahl Nebenbedingungen .....	168
Tabelle 19: Kennwerte Monte-Carlo-Simulation .....	177
Tabelle 20: Analyse der Maßnahmenauswahl (Grün entspricht Auswahl) .....	193
Tabelle 21: Betrachtete Energieeffizienzmaßnahmen Wechselwirkungsbewertung..	194

---

Tabelle 22: Virtuelle Maßnahme „Umsetzung Wärmepumpe & Dämmung.....	194
Tabelle 23: Betrachtete Maßnahmen Fallbeispiel 1 .....	197
Tabelle 24: Paarweiser Vergleich der Zieldimensionen in Fallbeispiel 1 .....	198
Tabelle 25: Gewichtung der Zieldimensionen in Fallbeispiel 1 .....	199
Tabelle 26: Zielgewichtungen im Fallbeispiel 1 .....	199
Tabelle 27: Einzelrisikobewertung Fallbeispiel 1 .....	200
Tabelle 28: Gesamtrisikobewertung Fallbeispiel 1 .....	201
Tabelle 29: Abweichung um Referenzwert 1,5 Millionen Euro (keine Nebenbedingung) .....	206
Tabelle 30: Anteil der ausgewählten Energieeffizienzmaßnahmen nach Regionen ...	207
Tabelle 31: Abweichung um Referenzwert 1,5 Millionen Euro (keine Nebenbedingung) .....	211
Tabelle 32: Verwendete Eingangswerte für die Monte-Carlo-Simulation.....	213
Tabelle 33: Modellparameter für regionenspezifische Energiepreisentwicklung (Szenario 1) .....	217
Tabelle 34: Szenario-Analyse der regionenspezifischen Entwicklung .....	220
Tabelle 35: Betrachtete Maßnahmen Fallbeispiel 2 .....	223
Tabelle 36: Paarweiser Vergleich Fallbeispiel 2 .....	224
Tabelle 37: Zielgewichtung Fallbeispiel 2.....	225
Tabelle 38: Zielgewichtungen Fallbeispiel 2.....	226
Tabelle 39: Einzelrisikobewertung Fallbeispiel 2 .....	226
Tabelle 40: Gesamtrisikobewertung Fallbeispiel 2 .....	227
Tabelle 41: Differenz zwischen Analyse mit und ohne Nebenbedingung um Referenzwert 3,5 Millionen Euro .....	232
Tabelle 42: Abweichung um Referenzwert 3,5 Millionen Euro mit Nebenbedingung	235

---

Tabelle 43: Verwendete Eingangswerte für Monte-Carlo-Simulation.....	239
Tabelle 44: Eingangsgrößen für Simulation (Investitionshöhe).....	241
Tabelle 45: Eingangsgrößen für Simulation (Energieeinsparung) .....	242



# 1. Einleitung

## 1.1. Ausgangssituation

Nach dem Philosophen und Autor Albert Camus ist das Leben die Summe aller getroffenen Entscheidungen (Leigh et al. 2006, S. 1). Der Erfolg von Unternehmen lässt sich ebenso auf eine Menge an getroffenen Entscheidungen zurückführen. Historisch fand jedoch bis in die späten Dreißigerjahre des vorhergehenden Jahrhunderts eine explizite Untersuchung von Entscheidungen weder in der Wissenschaft noch in der unternehmerischen Praxis statt. Im Gegenteil, es wurden Aktivitäten und Erfolge von Unternehmen vereinfacht als eine Konsequenz der bestehenden Hierarchien gesehen. (Hodgkinson 2008, S. 5)

Erst schrittweise konnte sich in den nachfolgenden Jahren die wissenschaftliche Untersuchung von Entscheidungen und dem Entscheidungsverhalten von Individuen und Unternehmen etablieren. Ergebnis dieses Prozesses war jedoch keine perfekte Rationalität von Entscheidungen. Im Gegenteil, es mussten Limitationen anerkannt werden, die die menschliche Fähigkeit, rationale Entscheidungen zu treffen, stark einschränken. (Leigh et al. 2006, S. 5)

Vor diesem Hintergrund lässt sich ein ähnliches Phänomen in der industriellen Energieeffizienz betrachten. Die sogenannte Energieeffizienz-Lücke beschreibt das Phänomen einer beobachteten Lücke zwischen dem tatsächlichen und optimalen Energieverbrauch. Energieeffiziente Technologien werden nicht in dem Maße genutzt, wie dies wirtschaftlich sinnvoll wäre, und haben nur einen begrenzten Erfolg auf dem Markt. (Gerarden et al. 2017, S. 1516; Jaffe et al. 1994, S. 804–805)

Autoren kommen zu dem Schluss, die meisten Hindernisse für Investitionen in der Energieeffizienz seien weder technisch noch wirtschaftlich, sondern verhaltensbedingt und führen einen Mangel an ganzheitlicher Betrachtung als Begründung an (Andrews et al. 2016; Killip et al. 2019, S. 306).

Mehrere Autoren sehen begrenzte Fortschritte in der Energieeffizienz eng verknüpft mit dem begrenzt rationalen Verhalten der beteiligten Akteure (Schmid 2004, S. 49; Simon 1997; Simon 1972). Entscheidungen in der Energieeffizienz werden demnach oftmals basierend auf unvollständigen Informationen getroffen, da die Sammlung von Informationen Beschränkungen, etwa durch die verfügbare Zeit, unterworfen ist. Darüber hinaus wird nur eine begrenzte Anzahl an Alternativen geprüft. Investitionsentscheidungen in der Energieeffizienz finden demnach unter eingeschränkten Informationen, Zeitbeschränkungen sowie mehr noch basierend auf „*einfachem Bauchgefühl*“ statt (Backlund et al. 2012, S. 393).

Im Zuge einer möglichst zügigen Reduzierung der Treibhausgasemissionen kommt der Energieeffizienz in der Industrie jedoch eine gewichtige Rolle zu. Bezogen auf Deutschland lagen die sektoralen Anteile am Endenergieverbrauch der Industrie bei 29 Prozent (699 TWh; Bundesministerium für Wirtschaft und Energie 2020, S. 26.) Eine Begrenzung des Treibhausgaseffekts ohne die Energieeffizienz ist „*keinesfalls zu erreichen*“, was sowohl für Deutschland als auch auf globaler Ebene gilt (Pehnt 2010, S. 10). Der Zwischenstaatliche Sachverständigenrat für Klimaänderungen (IPCC) sieht die Energieeffizienz als wichtiges Element, um innerhalb der Industrie angestrebte Emissionsreduktionen zu erreichen (IPCC 2022, S. 1163). Ebenso sieht auch die IEA eine weltweite Anstrengung zur Steigerung der Energieeffizienz als „*essentiell*“ für eine Minimierung der Treibhausgasemissionen (IEA 2021, S. 14). Die Energieeffizienz wird zudem als der kosteneffizienteste Weg gesehen, Treibhausgasemissionen in den nächsten Jahrzehnten zu reduzieren (Worrell et al. 2009, S. 120).

Ein Blick auf die gesteckten Ziele im Vergleich zur Zielerreichung innerhalb der EU verdeutlicht die Notwendigkeit weiterer Impulse in der Energieeffizienz. Im Jahr 2020 konnte die EU ihre gesteckten Energieeffizienzziele überraschend erreichen, wobei dies mit der Covid-19-Pandemie erklärt wird, durch die Energieverbräuche insbesondere im Industrie- und Transportsektor stark reduziert wurden. Schätzungen für Energieverbräuche des Jahres 2021 weisen jedoch auf starke Erholungen von Primärenergie- und Endenergieverbrauch hin, die voraussichtlich um 6 % bzw. 5 % gegenüber dem Niveau von 2020 gestiegen sind. Die Notwendigkeit weiterer Impulse



zeigt sich auch bei einem Blick auf die Projektionen der Treibhausgas-Emissionen, bei denen in einer Fortschreibung basierend auf aktuellen Maßnahmen die gesteckten Ziele für das Jahr 2030 voraussichtlich klar verfehlt werden (vgl. Abbildung 1). (EEA 2022, S. 9)

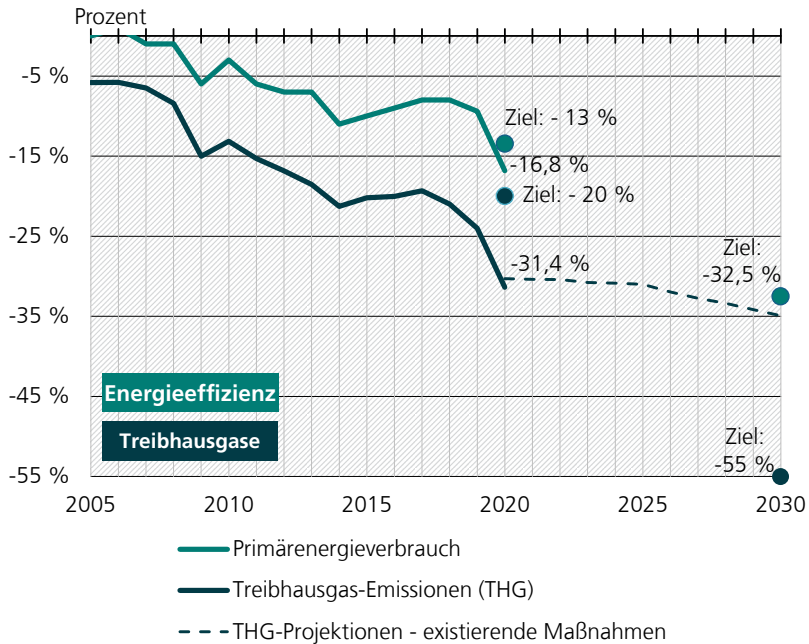


Abbildung 1: Fortschritte der EU bei Klima- und Energiezielen (EEA 2022; Umweltbundesamt 2022a)

An diesem Punkt zeichnet sich ein Spannungsfeld zwischen Entscheidungstheorie und industrieller Energieeffizienz ab. Energieeffizienz ist eine der entscheidenden Maßnahmen, die weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen zu reduzieren, ist in ihrer Umsetzung jedoch noch immer von Entscheidungsprozessen geprägt, die weitergehende Fortschritte hemmen.

These der vorliegenden Arbeit ist es, durch die Entwicklung eines Entscheidungsmodells für die Bestimmung optimaler Investitionsprogramme von Energieeffizienzmaßnahmen in

der Fabrik bestehende Hemmnisse abzubauen und hierdurch einen Beitrag zur weiteren Steigerung der industriellen Energieeffizienz zu leisten.

## 1.2. Problemstellung

Die konkrete, der Arbeit zugrunde liegende Problemstellung lässt sich aus unterschiedlichen Perspektiven motivieren und begründen:

Zunächst ist ein **Mangel an Entscheidungsmodellen** für die Auswahl von Energieeffizienzmaßnahmen zu beobachten. So kommen Andrews und Johnson im Rahmen einer Literaturrecherche über das Entscheidungsverhalten in Unternehmen zu dem Schluss, die meisten Hindernisse für Investitionen in die Energieeffizienz sind weder technisch noch wirtschaftlich, sondern verhaltensbedingt und führen einen Mangel an ganzheitlicher Betrachtung als Begründung an (Andrews et al. 2016; Killip et al. 2019, S. 306). Weitere Autoren heben angelehnt an die Forschung von Herbert Simon die begrenzte Rationalität durch Zeitbegrenzungen, beschränkte Aufmerksamkeit und verfügbare Ressourcen hervor, die zu einer **fehlenden Entscheidungsoptimierung** führt (Simon 1959; Simon 1972; Sorrell et al. 2000, S. 41–42). Der in der Praxis häufig vorzufindende Entscheidungsprozess in der Energieeffizienz wird beschrieben als „[...] *die Folge der Anwendung von Regeln auf Situationen statt einer systematischen Analyse von Alternativen*“ (Cooremans 2012, S. 498; Sorrell et al. 2000, S. 46).

Untersuchungen zeigen zudem die **Bedeutung und fehlende Einbeziehung von Risiken in Entscheidungsprozesse**, die zu den am häufigsten genannten Hindernissen von Unternehmen bei der Umsetzung von Energieeffizienzmaßnahmen gehören (Rohdin et al. 2007, S. 673–674). Unternehmen seien demnach eher dadurch motiviert, Risiken durch Investitionen in Energieeffizienzmaßnahmen zu vermeiden, als von den Vorteilen von Energieeffizienzmaßnahmen zu profitieren (Killip et al. 2019, S. 306).

Weiter hervorzuheben ist die **hohe Komplexität von Energieeffizienzmaßnahmen**. Patzak definiert Komplexität durch Varietät und Konnektivität, wobei unter Varietät die Anzahl und Unterschiedlichkeit der Systemelemente und unter Konnektivität die Anzahl und Unterschiedlichkeit der Beziehungen zwischen den Systemelementen verstanden

werden (Patzak 1982, S. 23; Wißler 2006, S. 23). Neben den Querschnitts- und Prozesstechnologien gibt es in der Energieeffizienz viele weitere branchenspezifische Ansatzpunkte (Dehning 2017, S. 16). Es wird hervorgehoben, dass aufgrund der thematischen Breite eine Vielzahl an branchenspezifischen Energiekonzepten existiert (Blesl et al. 2017, S. 13; Fleiter 2013). Aufgrund der hohen Anzahl, aber auch deren individuellen Charakterisierung lässt sich demnach eine hohe Varietät der Energieeffizienz folgern. Darüber hinaus ist eine hohe Konnektivität zu attestieren, da die Energieeffizienzmaßnahmen auch in ihrem Wirkungseffekt miteinander wechselwirken, was bei der Entscheidungsfindung einbezogen werden muss (Dehning 2017, S. 68).

Neben der bereits heute hohen Komplexität von Energieeffizienzmaßnahmen in der Industrie ist durch aktuelle Entwicklungen davon auszugehen, dass es mithilfe von Algorithmen zu einer zunehmend automatisierten Generierung von Energieeffizienzmaßnahmen kommen könnte. Hierdurch **steigt die Zahl der zu einem bestimmten Zeitpunkt verfügbaren Anzahl an Energieeffizienzmaßnahmen**. So wird beispielsweise an Ansätzen geforscht, die im Bereich der Druckluft automatisiert Leckagen erkennen und demnach ebenso automatisiert Energieeffizienzmaßnahmen generieren (Dierolf et al. 2021).

Warnecke hob bereits in der Vergangenheit für die Industrie hervor, dass *„die zunehmende Komplexität bei der Entscheidungsfindung nicht [...] ohne Systematik zu bewältigen ist. Ziel ist es die langfristigen Auswirkungen von Entscheidungen zu evaluieren und Risiken für das Unternehmen möglichst zu reduzieren“* (Warnecke 1995, S. 71). Dies verdeutlicht vor der beschriebenen hohen Komplexität der industriellen Energieeffizienz den Nutzen, aber auch die Notwendigkeit von Entscheidungsmodellen.

Es lässt sich festhalten: Industriebetriebe stehen vor einem komplexen Entscheidungsproblem bei der Auswahl von Energieeffizienzmaßnahmen, wobei durch die Formulierung und Analyse eines Entscheidungsmodells bestehende Hemmnisse bei Investitionen in Energieeffizienzmaßnahmen in der Fabrik abgebaut werden können.

### 1.3. Zielsetzung und Forschungsfrage

Die formulierte Zielsetzung basiert auf der von Hodgkinson formulierten These, dass Entscheidungsträger in der Praxis durch ein Entscheidungsmodell in ihrer rationalen Entscheidungsfindung unterstützt werden (Hodgkinson 2008, S. 5).

**Gestaltungsziel** der Arbeit ist die Entwicklung eines Artefakts in Form eines Entscheidungsmodells zur optimalen Maßnahmenauswahl von Energieeffizienzmaßnahmen in der Fabrik. Das zu formulierende Entscheidungsmodell soll Risiken und Wechselwirkungen sowie weitere unternehmerische Nebenbedingungen, etwa das verfügbare Investitionsbudget, einbeziehen. Mithilfe des Modells kann ein Entscheidungsträger simultan über die Durchführung von mehreren Energieeffizienzmaßnahmen entscheiden.

Das Erkenntnisziel geht dem Gestaltungsziel logisch voraus (vom Brocke 2002; Becker et al. 2009, S. 75). Das **Erkenntnisziel** der Arbeit in Form einer Beantwortung der zentralen Forschungsfrage lautet:

**Wie kann ein Entscheidungsmodell für die optimierte Auswahl von Energieeffizienzmaßnahmen in der Fabrik konzipiert werden?**

Optimal ist im mathematischen Sinn definiert und beschreibt die Minimierung oder Maximierung einer Funktion. Eine Energieeffizienzmaßnahme ist nach einer Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates über Endenergieeffizienz und Energiedienstleistungen (EDL-Richtlinie) definiert als „[...] *alle Maßnahmen, die in der Regel zu überprüfbar und mess- oder schätzbaren Energieeffizienzverbesserungen führen*“ (Richtlinie 2012/27/EU 2012).

Zur Beantwortung der zentralen Forschungsfrage sind Teilforschungsfragen zu beantworten, die einen jeweiligen Beitrag zur Beantwortung der übergeordneten Forschungsfrage und des Erkenntnisziels liefern.

1. *Welche Anforderungen werden an ein Entscheidungsmodell für die optimierte Auswahl von Energieeffizienzmaßnahmen in der Fabrik gestellt?*

2. *Wie kann ein relevantes Zielsystem für die Auswahl von Energieeffizienzmaßnahmen in der Fabrik gestaltet werden?*
3. *Wie kann ein Bewertungsmodell für Energieeffizienzmaßnahmen gestaltet werden?*
4. *Wie kann ein Entscheidungsmodell für die Bestimmung optimaler Investitionsprogramme von Energieeffizienzmaßnahmen in der Fabrik konzipiert werden?*

In Summe wird durch Beantwortung der Teilforschungsfragen die übergeordnete Forschungsfrage der Arbeit beantwortet und hierdurch der Erkenntnisgewinn der Arbeit erfüllt (vgl. Abbildung 2).

#### Problemstellung

- Mangel an Entscheidungsmodellen für die optimale Auswahl von Energieeffizienzmaßnahmen in der Fabrik
- Fehlende Berücksichtigung von Risiken in der Entscheidungsfindung
- Energieeffizienzmaßnahmen weisen eine hohe Komplexität auf
- Durch Automatisierung stehen zu einem gegebenen Zeitpunkt zunehmend mehr Energieeffizienzmaßnahmen zur Auswahl



#### Erkenntnisziel

- Beantwortung der Forschungsfrage:
  - *Wie kann ein Entscheidungsmodell für die optimierte Auswahl von Energieeffizienzmaßnahmen in der Fabrik konzipiert werden?*



#### Gestaltungsziel

- Entwicklung eines Entscheidungsmodells für die Bestimmung optimaler Investitionsprogrammen von Energieeffizienzmaßnahmen in der Fabrik

Abbildung 2: Zusammenfassung von Problemstellung und Zielsetzung

#### 1.4. Wissenschaftstheoretische Positionierung und Forschungsmethode

Nachdem in den vorangegangenen Kapiteln Motivation, Problemstellung und Zielsetzung des Forschungsvorhabens erläutert wurden, befasst sich dieses Kapitel mit der wissenschaftstheoretischen Positionierung und der gewählten Forschungsmethode.

Der Ökonom und Soziologe Max Weber vertritt in seinem 1919 erschienenen Aufsatz „Wissenschaft als Beruf“ die Ansicht, der wissenschaftliche Fortschritt sei ein wichtiger Teil eines Intellektualisierungsprozesses, dessen Bestandteil auch die wissenschaftlich orientierte Technik ist, der die Welt und alle Dinge zumindest prinzipiell berechenbar macht und damit „entzaubert“ (Weber 2019).

Dem Begriff Wissenschaft können je nach Verwendung unterschiedliche Bedeutungen zugeordnet werden, die eine Tätigkeit aber auch ein Ergebnis beschreiben können. Mit der Intention, eine Vorbedingung zu finden, die abgrenzt, was Wissenschaft ist und was nicht Wissenschaft ist, formuliert Wohlgenannt die Forderung, dass *„[...] Erkenntnis, und nicht etwa nur ein Ausdruck von Gefühlen oder die Befriedigung von Gemütsbedürfnissen“* angestrebt und in methodischer Weise gewonnen wird. Zudem darf diese Erkenntnis *„[...] kein vereinzelt Wissen, sondern [muss] systematischen Charakter haben“* (Wohlgenannt 1969, S. 26–32).

Bei den Einzelwissenschaften kann zwischen Formal- und Realwissenschaften unterschieden werden. Erstere befassen sich mit der Konstruktion von Zeichensystemen und umfassen etwa Philosophie, Logik und Mathematik. Die Realwissenschaften können weiter unterteilt werden in Grundlagenwissenschaft, die das Ziel der Erklärung von empirischen Wirklichkeitsausschnitten verfolgt, sowie in angewandte Wissenschaft, deren Zweck die Gestaltung und Entwicklung sozialer und technischer Systeme sowie von Entscheidungsmodellen und -prozessen ist. Die angewandte Wissenschaft umfasst etwa die Ingenieurwissenschaft sowie die Betriebswirtschaftslehre. (Ulrich et al. 1979, S. 305)

Ulrich sieht die Charakterisierung der anwendungsorientierten Wissenschaft in der Nutzung und Anwendung der Grundlagenwissenschaften auf praktische Probleme mit dem Ziel eines Strebens nach nützlichem Wissen (Ulrich 1982, S. 170–171). Die in der

anwendungsorientierten Wissenschaft betrachteten Probleme entstehen direkt aus der Praxis, wobei Ulrich diese Eigenschaft der anwendungsorientierten Wissenschaft als grundlegend betrachtet (Ulrich 1982, S. 172).

Ulrich sieht als eines der „wesentlichen und grundsätzlichen“ Unterscheidungsmerkmale zwischen der angewandten und der Grundlagenforschung, dass in der angewandten Wissenschaft nicht die Wahrheit wissenschaftlicher Aussagen, sondern der praktische Nutzen Bewertungskriterium dieser ist. Demnach sei die von Max Weber geforderte Wertfreiheit der Wissenschaft für die angewandte Wissenschaft so nicht haltbar, da die Nutzenbewertung der angewandten Wissenschaft immer auch ein subjektives Werturteil darstellt (Ulrich 1982, S. 206).

Ropohl definiert Technik als „[...] die Menge der nutzenorientierten, künstlichen, gegenständlichen Gebilde (Artefakte oder Sachsysteme), die Menge menschlicher Handlungen und Einrichtungen, in denen Sachsysteme entstehen und die Menge menschlicher Handlungen, in denen Sachsysteme verwendet werden“ (Ropohl 2009, S. 31).

Gegenstand dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Entscheidungsmodells für die optimale Bestimmung von Investitionsprogrammen für Energieeffizienzmaßnahmen in der Fabrik. Ziel ist demnach die Entwicklung eines technischen Artefakts in Form eines Entscheidungsmodells, welches für den Anwender einen praktischen Nutzen bei der Auswahl von Energieeffizienzmaßnahmen bieten soll. Das zu entwickelnde Entscheidungsmodell ist aus der präskriptiven Entscheidungstheorie abgeleitet, die sich damit befasst, wie sich Entscheidungsträger verhalten sollen (Meyer 2000, S. 2). Dies beinhaltet die Formulierung von Werturteilen, durch die wiederum ebenfalls eine Verortung in der anwendungsorientierten Wissenschaft gegeben ist. Ulrich und Hill sehen bei der Entwicklung von Entscheidungsmodellen deren Praxisrelevanz als primäres Ziel (Ulrich et al. 1979, S. 347).

Die Designwissenschaft (Design Science) wird als grundlegender Problemlösungsansatz für die Entwicklung von Artefakten beschrieben, dessen Wurzeln in der Ingenieurwissenschaft verortet sind (Hevner et al. 2004, S. 76). Im Rahmen der

Designwissenschaft wurde eine Vielzahl an Forschungsmethoden entwickelt, für deren Auswahl Venable et al. einen Leitfaden liefern (Venable et al. 2017). Basierend auf diesem wird für das zuvor präsentierte Forschungsvorhaben die Forschungsmethode Design Science Research Methodology (DSRM) gewählt. Auswahlkriterium ist insbesondere dessen Fokus auf die Anwendbarkeit des Artefakts in der Praxis und deren Validierung. Der Forschungsprozess des DSRM umfasst folgende Schritte (Peffer et al. 2007, S. 4): Problemerkennung und Motivation, Definition der Ziele für eine Lösung, Entwurf und Entwicklung, Demonstration, Bewertung und Kommunikation. Hierbei handelt es sich um einen iterativen Forschungsprozess, wie er bereits von Tomczak vorgeschlagen wurde (Tomczak 1992).

Die Problemerkennung und Motivation definiert das spezifische Forschungsproblem und motiviert den Nutzen einer Lösung (Peffer et al. 2007, S. 4). Teile der Motivation und der Problemstellung wurden bereits in vorherigen Teilkapiteln vorgestellt. Eine genauere Definition des Gegenstandsbereichs erfolgt in Kapitel 4.1.

Die Definition der Ziele einer Lösung umfasst die Ableitung von Anforderungen an eine Lösung aus der zuvor definierten Problemstellung. Anforderungen können dabei sowohl quantitativer als auch qualitativer Natur sein (Peffer et al. 2007, S. 4). Die Ableitung der Anforderungen erfolgt in Kapitel 4.2. Diese dienen ebenfalls als Bewertungskriterien für die Sichtung des Stands der Wissenschaft und der Technik.

Im dritten Schritt folgt der Entwurf und die Entwicklung des Artefakts. Die Tätigkeiten umfassen die Festlegung der gewünschten Funktionalitäten des Artefakts und dessen Architektur (Peffer et al. 2007, S. 5). Entwurf und Entwicklung sind Hauptteil der Arbeit und finden in Kapitel 5 statt.

Im weiteren Verlauf erfolgt die Anwendung des Artefakts und dessen Validierung auf eine oder mehrere Instanzen der definierten Problemstellung (Peffer et al. 2007, S. 13). Bezugnehmend auf die von Becker et al. vorgestellten Möglichkeiten der Validierung werden im Rahmen des Forschungsvorhabens zwei Arten der Validierung verfolgt (Becker et al. 2009, S. 75):



1. Das **Artefakt wird gegen die identifizierte Forschungslücke validiert**, indem die Erfüllung der Anforderungen des konstruierten Artefakts evaluiert wird.
2. Das **Artefakt wird gegen die Realwelt, bzw. gegen einen Ausschnitt aus der Realwelt, validiert**, um den Nutzen des Artefakts zu bewerten.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens werden zwei Fallbeispiele betrachtet, auf die das Entscheidungsmodell angewandt wird. Die Validierung umfasst zudem einen Abgleich der Anforderungen an die Lösungen mit der tatsächlichen Umsetzung. Abschließend werden der Nutzen und die Neuartigkeit des entwickelten Artefakts reflektiert sowie der weitere Forschungsbedarf aufgezeigt.

Die Forschungsmethode und die beiden verwendeten Ansätze für die Validierung münden in den in Abbildung 3 dargestellten Forschungsansatz angelehnt an Becker et al. 2009.

Die Erkenntnisziele der Arbeit spiegeln die Beantwortung der zuvor vorgestellten Forschungsfragen wider. Gestaltungsziel ist die Entwicklung eines nützlichen Artefakts in Form eines Entscheidungsmodells für die optimale Auswahl von Investitionsprogrammen für Energieeffizienzmaßnahmen in der Fabrik, welches alle definierten Anforderungen erfüllt.

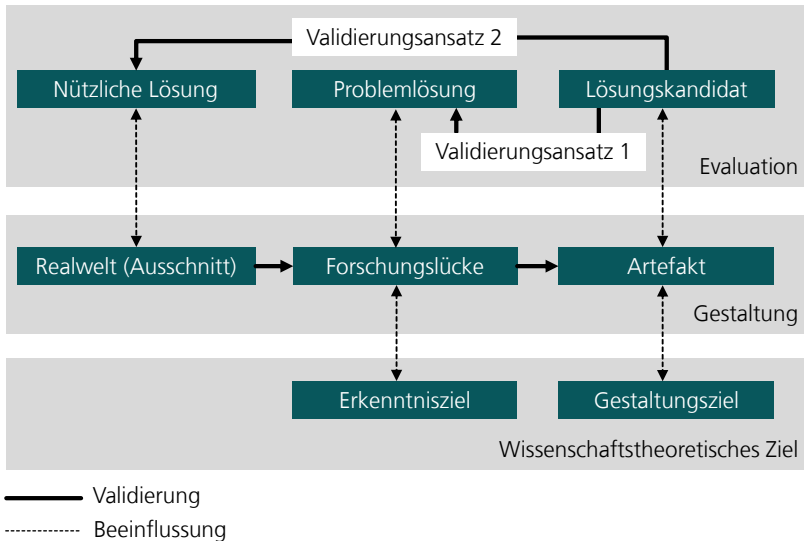


Abbildung 3: Forschungsansatz angelehnt an Becker et al. 2009

Die untergeordneten Teilforschungsfragen spiegeln die Struktur der Arbeit wider. In Kapitel 1 wurden bereits Ausgangssituation und Problemstellung der Arbeit motiviert. Ebenso erfolgte die Formulierung von Zielsetzung und Forschungsfragen sowie die Vorstellung der wissenschaftstheoretischen Positionierung und Forschungsmethode.

Kapitel 2 zielt auf die Aufarbeitung der für die Beantwortung der zugrunde liegenden Forschungsfragen notwendigen Grundlagen ab. Hierbei werden zunächst relevante Beschreibungsdimensionen der Fabrik und notwendige Definitionen erarbeitet. Weitere Grundlagen aus den Bereichen Unternehmens- und Investitionsplanung, Energieeffizienz in der Industrie, der Entscheidungstheorie und des Risikomanagements schließen das Kapitel ab.

Auf Basis der Grundlagen erfolgt in Kapitel 3 die Vorstellung des Stands der Technik und Wissenschaft. Im Fokus sind dabei Ansätze zur Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen, Entscheidungsmodelle sowie Ansätze zur Bewertung von Risiken von Energieeffizienzmaßnahmen.

In Kapitel 4 wird zunächst der Gegenstandsbereich genauer definiert und anschließend relevante Anforderungen an ein Entscheidungsmodell für Energieeffizienzmaßnahmen abgeleitet. Ziel ist eine präzise Beschreibung der Anforderungen und deren Abgleich mit gesichteten Ansätzen, die in einer Beschreibung des offenen Handlungsbedarfs münden.

Kapitel 5 widmet sich der Entwicklung des Entscheidungsmodells und der Vorstellung von dessen Bestandteilen, insbesondere des Ziel- und Bewertungssystems sowie einer Methode für die Risikobewertung. Innerhalb des Kapitels wird das Gestaltungsziel eines nützlichen Artefakts in Form eines Entscheidungsmodells für die optimale Auswahl von Investitionsprogrammen für Energieeffizienzmaßnahmen in der Fabrik entwickelt.

Kapitel 6 dient der Validierung des Entscheidungsmodells in Form von zwei Fallbeispielen und einem Abgleich mit den Anforderungen. Hierbei werden die zuvor vorgestellten Validierungsansätze durchgeführt, indem das Artefakt gegen einen Ausschnitt der Realwelt validiert wird sowie die Erfüllung von dessen Anforderungen geprüft wird.

Die Arbeit schließt mit Kapitel 7 in Form einer Reflexion, welche eine Prüfung der Beantwortung der Forschungsfragen beinhaltet, welche das Erkenntnisziel der Arbeit darstellt. Zudem werden die Ergebnisse zusammengefasst und in einem Ausblick weiterer Forschungsbedarf aufgezeigt.

Der Aufbau der Arbeit ist in Abbildung 4 zusammengefasst, wobei zusätzlich die einzelnen Kapitel der Arbeit den Schritten der gewählten Forschungsmethode der Design Science Research Methodology zugeordnet wurden.

### 1.5. Struktur der Arbeit

Die untergeordneten Teilforschungsfragen spiegeln die Struktur der Arbeit wider. In Kapitel 1 wurden bereits Ausgangssituation und Problemstellung der Arbeit motiviert. Ebenso erfolgte die Formulierung von Zielsetzung und Forschungsfragen sowie die Vorstellung der wissenschaftstheoretischen Positionierung und Forschungsmethode.

Kapitel 2 zielt auf die Aufarbeitung der für die Beantwortung der zugrunde liegenden Forschungsfragen notwendigen Grundlagen ab. Hierbei werden zunächst relevante

Beschreibungsdimensionen der Fabrik und notwendige Definitionen erarbeitet. Weitere Grundlagen aus den Bereichen Unternehmens- und Investitionsplanung, Energieeffizienz in der Industrie, der Entscheidungstheorie und des Risikomanagements schließen das Kapitel ab.

Auf Basis der Grundlagen erfolgt in Kapitel 3 die Vorstellung des Stands der Technik und Wissenschaft. Im Fokus sind dabei Ansätze zur Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen, Entscheidungsmodelle sowie Ansätze zur Bewertung von Risiken von Energieeffizienzmaßnahmen.

In Kapitel 4 wird zunächst der Gegenstandsbereich genauer definiert und anschließend relevante Anforderungen an ein Entscheidungsmodell für Energieeffizienzmaßnahmen abgeleitet. Ziel ist eine präzise Beschreibung der Anforderungen und deren Abgleich mit gesichteten Ansätzen, die in einer Beschreibung des offenen Handlungsbedarfs münden.

Kapitel 5 widmet sich der Entwicklung des Entscheidungsmodells und der Vorstellung von dessen Bestandteilen, insbesondere des Ziel- und Bewertungssystems sowie einer Methode für die Risikobewertung. Innerhalb des Kapitels wird das Gestaltungsziel eines nützlichen Artefakts in Form eines Entscheidungsmodells für die optimale Auswahl von Investitionsprogrammen für Energieeffizienzmaßnahmen in der Fabrik entwickelt.

Kapitel 6 dient der Validierung des Entscheidungsmodells in Form von zwei Fallbeispielen und einem Abgleich mit den Anforderungen. Hierbei werden die zuvor vorgestellten Validierungsansätze durchgeführt, indem das Artefakt gegen einen Ausschnitt der Realwelt validiert wird sowie die Erfüllung von dessen Anforderungen geprüft wird.

Die Arbeit schließt mit Kapitel 7 in Form einer Reflexion, welche eine Prüfung der Beantwortung der Forschungsfragen beinhaltet, welche das Erkenntnisziel der Arbeit darstellt. Zudem werden die Ergebnisse zusammengefasst und in einem Ausblick weiterer Forschungsbedarf aufgezeigt.

Der Aufbau der Arbeit ist in Abbildung 4 zusammengefasst, wobei zusätzlich die einzelnen Kapitel der Arbeit den Schritten der gewählten Forschungsmethode der Design Science Research Methodology zugeordnet wurden.

		DSRM-Schritt		
Kap. 1	Einleitung	Problemerkennung und Motivation		
Kap. 2	Grundlagen	Aufarbeitung der relevanten Grundlagen		
	2.1 Beschreibungsmodell Fabrik			
	2.1 Unternehmens- und Fabrikplanung			
	2.3 Entscheidungstheorie			
	2.4 Energieeffizienz in der Fabrik			
	2.5 Risikomanagement			
Kap. 3	Stand der Technik und der Forschung	Aufarbeitung des Stands der Technik und der Wissenschaft		
	3.1 Vorgehen		3.2 Vorstellung betrachteter Ansätze	3.3 Zusammenfassung und Zwischenfazit
Kap. 4	Reflexion des Stands der Technik und Wissenschaft	Definition der Ziele einer Lösung		
	4.1 Definition des Gegenstandsbereichs			
	4.2 Ableitung der Anforderungen			
	4.3 Einordnung der betrachteten Ansätze			
Kap. 5	Entwicklung Entscheidungsmodell	Entwurf und die Entwicklung des Artefakts		
	5.1 Methodisches Vorgehen		5.2 Klassifizierung	5.3 Zielsystem
	5.4 Bewertungsmodell		5.5 Nebenbedingungen	5.6 Entscheidungsregeln
	5.7 Monte-Carlo-Simulation			
	5.8 Entscheidungsvisualisierung			
Kap. 6	Implementierung und Validierung	Anwendung des Artefakts und dessen Validierung		
	6.1 Vorgehen			
	6.2 Implementierung			
	6.3 Anwendungsübergreifende Modelluntersuchung			
	6.4 Anwendung des Entscheidungsmodells			
	6.5 Bewertung der Erfüllung der Anforderungen			
Kap. 7	Reflexion, Zusammenfassung und Ausblick	Kommunikation		

Abbildung 4: Struktur der Arbeit

## 2. Grundlagen

Im folgenden Kapitel werden die Grundlagen aufbereitet. Es wird der Gegenstandsbereich in Form des Beschreibungsmodells der Fabrik definiert und relevante Aspekte der Unternehmens- und Investitionsplanung vorgestellt. Anschließend werden die relevanten Grundlagen der Entscheidungstheorie und der Energieeffizienz in der Fabrik aufgezeigt. Abschließend werden Aspekte der Risikobewertung vorgestellt und ein Zwischenfazit gezogen.

### 2.1. Beschreibungsmodell Fabrik

Ziel der Arbeit ist die Entwicklung eines Entscheidungsmodells für die Bestimmung optimaler Investitionsprogramme in der Fabrik. Hierfür muss zunächst der Begriff der Fabrik definiert und relevante Beschreibungsebenen vorgestellt werden.

#### 2.1.1. Definitionen

Für die weitergehenden Betrachtungen ist es notwendig, die verwendeten Begrifflichkeiten einzuführen und genauer zu definieren. Für die weitere Verwendung müssen insbesondere die Begriffe Unternehmen, Betrieb und Fabrik definiert und voneinander abgegrenzt werden, um hierdurch den Anwendungsbereich des Entscheidungsmodells genauer zu verorten.

Westkämper sieht Unternehmen als **sozio-technische Systeme**, die Werte in Form von Produkten erzeugen. Die soziale Komponente ist durch die im Unternehmen arbeitenden Menschen gegeben, die Technik etwa in Form von Maschinen mit dem Zweck einer höheren Rationalisierung verwenden. (Westkämper et al. 2006, S. 33)

Ropohl unterstreicht die Bedeutung des sozio-technischen Systembegriffs und sieht „[...] *technische und gesellschaftliche Momente unauflöslich miteinander verbunden*“ (Ropohl 2009, S. 142).

Eine **Fabrik** lässt sich durch folgende Punkte charakterisieren (Westkämper et al. 2006, S. 38; Zahn et al. 1996, S. 60–61): *„Arbeitsteilung und Zerlegung der ausführenden Tätigkeiten, Spezialisierung für einzelne Aufgabenbereiche, Anlagenintensität, hoher Kapitaleinsatz für technisch anspruchsvolle Anlagen und Maschinen, wachsende Unternehmensgrößen zur Realisierung niedriger Stückkosten, Produktion und Absatz materieller Güter für einen großen, meist anonymen Markt.“*

**Betriebe** sind Wirtschaftseinheiten, deren Fokus auf der Wertschöpfung liegt und die durch das Prinzip der Wirtschaftlichkeit und einer Wahrung des finanziellen Gleichgewichts charakterisiert sind (Dyckhoff 1994, S. 7). Den **Industriebetrieb** im Speziellen definiert Zahn als *„[...] ein real erfahrbares, beschreibbares, erklärbares und gestaltbares Objekt in der Kulturwelt der Menschen“* (Zahn et al. 1996, S. 45). Zahn hebt hervor, dass es sich bei der Fabrik um die heute vorherrschende industrielle Betriebsform handelt, die sprachlich den Industriebetrieb impliziert (Zahn et al. 1996, S. 50).

Schmigalla definiert die **Fabrik** als einen industriellen Betrieb, der erwerbswirtschaftliche oder gemeinwirtschaftliche Zwecke verfolgt, und hebt hervor, dass der Begriff vor allem dann verwendet wird, wenn produktionstechnische oder produktionsorganisatorische Aspekte im Vordergrund stehen (Schmigalla 1995, S. 34). Müller definiert eine Fabrik als *„[...] die Gesamtheit aller in einem räumlichen und funktionalen Zusammenhang stehender Einrichtungen, die dazu dienen, gewerbliche Erzeugnisse im industriellen Maßstab herzustellen. Im Unterschied zu den Werkstätten des Handwerks oder zur Manufaktur ist die industrielle Produktion durch eine starke Arbeitsteilung, eine hohe Mechanisierung und oft auch eine hohe Automatisierung gekennzeichnet“* (Müller et al. 2009, S. 35). Eine weitere Definition findet sich in der VDI-Richtlinie 5200: *„Die Fabrik bezeichnet den Ort, an dem Wertschöpfung durch arbeitsteilige Produktion industrieller Güter unter Einsatz von Produktionsfaktoren stattfindet“* (VDI 5200-1:2009-01, S. 2).

Der Begriff Fabrik soll im weiteren Verlauf im Sinne der Definition nach Müller verwendet werden, da diese die größte Überschneidung mit dem noch zu definierenden Gegenstandsbereich der Arbeit hat. Die Verwendung des Adjektivs „industriell“ soll wiederum eine Verortung innerhalb der Fabrik kennzeichnen, etwa im Fall von industriellen Energieeffizienzmaßnahmen.

### 2.1.2. Ziele

Westkämper sieht Unternehmen zunächst primär in der Pflicht, relevante Gesetze und Vorschriften des Staates sowie technische Regelwerke und Richtlinien einzuhalten (Westkämper et al. 2006, S. 63–64). Hierin lässt sich jedoch nur ein grober erster Rahmen für die Zielsetzung erkennen, der vor allem abgrenzt, was außerhalb des möglichen Handlungsrahmens liegt. Eine operative Zielsetzung lässt sich in dieser Definition noch nicht erkennen.

Müller et al. unterscheiden zwischen dem von Interessen der Kapitalgeber getriebenen Shareholder-Value-Ansatz mit dem Ziel einer möglichst hohen Gewinnerzielung und dem Stakeholder-Value-Ansatz mit dem Ziel, Ansprüche und Interessen aller Personengruppen, die einen Bezug zum Unternehmen haben, einzubeziehen. Aufgabe der Unternehmensführung ist es, aus dem Unternehmenszweck und den Präferenzen der Stakeholder operationalisierte Unternehmensziele abzuleiten, deren Umsetzung zu veranlassen und zu kontrollieren. (Müller et al. 2009, S. 57)

Ähnlich dem Stakeholder-Ansatz verweist Westkämper bei der Formulierung von Zielsetzungen und Handlungsweisen durch die Unternehmensführung auf weitere Interessengruppen, deren Einfluss auf die Ziele zu berücksichtigen ist. Zu nennen sind Kapitalgeber, Kunden, Mitarbeitende sowie die Öffentlichkeit, die nicht nur die Einhaltung der Gesetze, sondern auch die Bezahlung von Steuern und ein Engagement für die öffentlichen Belange erwartet. Diese Interessengruppen besitzen jeweils individuelle Zielsetzungen und wünschen sich deren Vertretung durch die Unternehmensführung, welche die Vielzahl an Partikularinteressen berücksichtigen und moderieren muss. (Westkämper et al. 2006, S. 64)

TerHorst sieht die Formulierung von Unternehmenszielen als einen Bestandteil der Unternehmensführung, welche mit nur begrenzt vorhandenen Ressourcen erreicht werden müssen. Demnach sind Unternehmensziele immer unternehmensindividuell und können nur schwer verallgemeinert werden. Konkrete Ziele müssen in diesem Spannungsfeld formuliert werden und bieten dennoch nur einen begrenzten Maßstab für die Ableitung und Bewertung von Maßnahmen für die Zielerreichung. (TerHorst 1980, S. 24)



Bei einer weiteren Präzisierung muss bei Unternehmenszielen zwischen Formal- und Sachzielen unterschieden werden (Müller et al. 2009, S. 59): *„Sachziele beziehen sich auf die Art, Menge, Qualität, den Ort und die Zeit der herzustellenden Produkte oder der zu erbringenden Dienstleistungen. [...] Formalziele drücken den angestrebten Erfolg des Unternehmens aus. Zu den Formalzielen zählen daher zuerst die Finanzziele. Oberste Priorität haben dabei die Liquidität (als Voraussetzung für die wirtschaftliche Existenz des Unternehmens) und der Gewinn (als maßgeblicher Unternehmenszweck).“*

Thommen et al. sehen in Zielen vor allem einen Ausdruck dessen, worauf sich das Unternehmen in seinem Handeln ausrichten soll. Sachziele seien dabei vor allem bezogen auf das konkrete Handeln bei der betrieblichen Funktion, während Formalziele übergeordnete Ziele darstellen, an denen sich die Sachziele ausrichten. (Thommen et al. 2017, S. 44)

Warnecke beschreibt die allgemeine Aufgabe des Unternehmens als ein Zuordnungsproblem. *„Die drei Organisationselemente Mensch, Sachmittel und Aufgabe sind einander so zuzuordnen, dass diejenigen erstrebten Leistungen entstehen, die sich aus der Gesamtaufgabe des Unternehmens ergeben. Eine Aufgabe entsteht in der Regel aus einer Bedürfnis- oder Mangellage, in die sich ein Unternehmen einschaltet.“* (Warnecke 1995, S. 12)

Die Einzelziele werden in einem **Zielsystem** zusammengefasst. *„Unter einem Zielsystem ist eine strukturierte Menge vom Unternehmer für eine oder mehrere Wirtschaftsperioden simultan verfolgter Ziele zu verstehen“* (Schmidt-Sudhoff 1967, S. 22).

Zusammenfassend zeigt sich, dass Unternehmensziele weitestgehend individuell von Unternehmen festgelegt werden müssen, die Menge der Möglichkeiten jedoch durch die Einhaltung von Gesetzen und Normen eingeschränkt wird. Aufbauend von dieser Ausgangslage entsteht eine Vielzahl an Einzelzielen, die vielfältig durch den Energieeinsatz beeinflusst werden.

### 2.1.3. Lebenszyklus

Durch Einführung der Zeit als Betrachtungskriterium ergibt sich der Fabriklebenszyklus und dessen Phasen. Auf der übergeordneten Ebene der Unternehmen kann zwischen den drei Typen Start-up-Unternehmen in einer sehr frühen Phase der Unternehmensentwicklung, Wachstumsunternehmen sowie etabliertes Unternehmen unterschieden werden. (Thommen et al. 2017, S. 38)

Bezogen auf die Fabrik erstrecken sich die einzelnen Phasen des Lebenszyklus von der Entwicklung bis zum Abbau der Fabrik. Schenk hebt hervor, dass diese gleichzeitig auch Planungsphasen darstellen, die sich wiederum in jeweils drei Planungsstufen untergliedern (Schenk et al. 2004, S. 108). Die fünf Planungsphasen der Lebenszyklengestaltung von Produktions- und Fabrikssystemen und dessen Aufgaben sind (Schenk et al. 2004, S. 111–123):

- **Entwicklung:** Festlegung der Fabrik- und Projektziele. Auf Basis der Zielfestlegung erfolgt bei positiver Entscheidung der Projektstart.
- **Aufbau:** Dieser umfasst die Ausführungsplanung sowie die Systemrealisierung und -erprobung.
- **Anlauf:** Im Rahmen des Prozesses des Anlaufmanagements erfolgt der Neuanlauf der Fabrik.
- **Betrieb:** Der Betrieb stellt das eigentliche Ziel des Unternehmens dar. Innerhalb der Systemnutzung findet ein kontinuierlicher Verbesserungsprozess (KVP) statt.
- **Abbau:** Dieser kann in Form einer Sanierung, Außerbetriebnahme und Verwertung erfolgen, wobei Letztere eine Weiterverwertung funktionstüchtiger Systemkomponenten beinhaltet.

### 2.1.4. Systemebenen

Produzierende Unternehmen lassen sich in mehrere System- oder Produktionsebenen unterteilen (Liebl 2019, S. 49; Westkämper et al. 2006, S. 56). Die im nachfolgenden dargestellte Einteilung nach Westkämper unterscheidet zwischen sieben verschiedenen Ebenen, die von der Prozessebene bis zu Produktionsnetzwerken reicht. Diese können

auch als Systemebenen bezeichnet werden, wobei niedrigere Ebenen jeweils ein Subsystem der höheren Ebene sind (Westkämper et al. 2006, S. 56).

Die einzelnen Ebenen können folgendermaßen charakterisiert werden (Westkämper et al. 2006, S. 55–58):

- **Produktionsnetzwerke** sind die Gesamtheit der an der Herstellung eines Produktes beteiligten Werke und Fabriken.
- **Produktionsstandorte** sind lokale Standorte mit Produktionsprozessen und können mehrere Produktionssegmente umfassen.
- **Produktionssegmente** stellen die Aufteilung eines Produktionsstandortes in eigenständige Produktionsbereiche dar. Die Segmentierung erfolgt nach Technologien oder Funktionen.
- **Fertigungs- und Montagesysteme** umfassen sowohl Maschinen und Anlagen als auch Ver- und Entsorgungssysteme.
- **Fertigungs- und Montagezellen** sind zu einer lokalen Einheit zusammengefasste Maschinen und Arbeitsplätze.
- **Arbeitsplätze** und Maschinen können als autonome Teilsysteme und Leistungseinheiten betrachtet werden und umfassen auch die Medienversorgung, etwa mit Gas, Wasser oder Druckluft.
- **Prozesse** sind sowohl wertschöpfende als auch nicht wertschöpfende Vorgänge und können sowohl technisch als auch organisational sein.

Abbildung 5 verdeutlicht das Konzept und stellt die einzelnen Systemebenen grafisch dar.

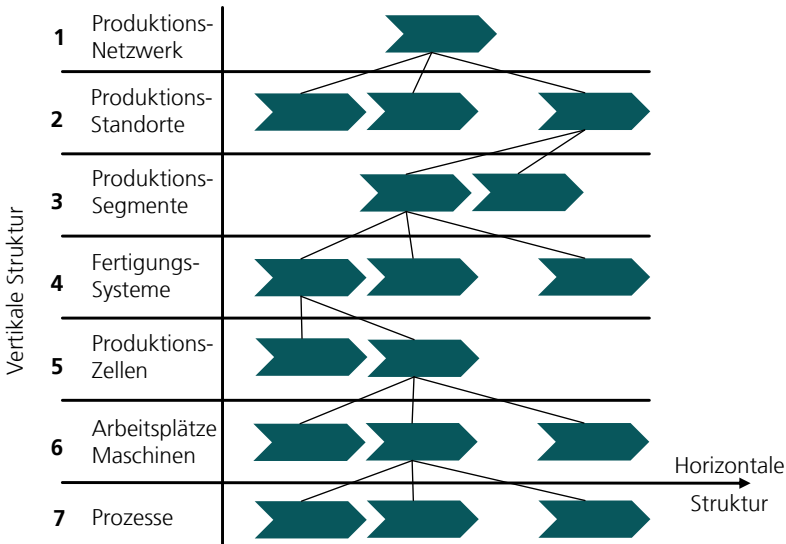


Abbildung 5: Systemebenen der Fabrik (Westkämper et al. 2009, S. 61)

## 2.2. Unternehmens- und Investitionsplanung

Die Bestimmung optimaler Investitionsprogramme für Energieeffizienzmaßnahmen in der Fabrik lässt sich innerhalb der Investitionsplanung verorten. Hierfür werden zunächst relevante Begriffe definiert und ausgewählte Verfahren die Investitionsbewertung und -rechnung vorgestellt.

### 2.2.1. Unternehmens- und Fabrikplanung

Wirtschaftliches Handeln lässt sich als ein zielgerichteter, rationaler Prozess beschreiben. Domschke et al. weisen darauf hin, dass die Abgrenzung zwischen Planung und Entscheidung, im Sinne von entscheiden für etwas, in der Literatur umstritten ist und beide Begriffe eng miteinander verbunden sind, da innerhalb eines Planungsprozesses zahlreiche Entscheidungen zu treffen sind. (Domschke et al. 2015, S. 1–2).

Adam beschreibt die Ursache jeder Planung als eine Differenz zwischen einem Istzustand und einem angestrebten Sollzustand, der unter möglichst geringem Ressourceneinsatz

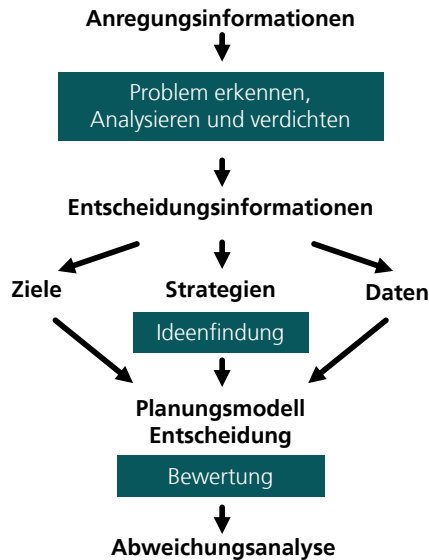
überwunden werden soll. Grundlegende Fragestellungen von Planungsprozessen seien die Auswahl von Zielsetzungen für die Wahl von konkurrierenden Alternativen sowie die Abwägung des Nutzens bei Verwendung von begrenzten Ressourcen. (Adam 1993, S. 1)

Warnecke motiviert die Notwendigkeit einer systematischen Unternehmensplanung durch komplexe Entscheidungen, die kurzfristig getroffen werden müssen, aber langfristige Auswirkungen auf den Bestand des Unternehmens haben. Es wird hervorgehoben, dass die zunehmende Komplexität bei der Entscheidungsfindung nicht mehr ohne Systematik zu bewältigen sei. Ziel solle es deshalb sein, die langfristigen Auswirkungen von Entscheidungen zu evaluieren und Risiken für das Unternehmen möglichst zu reduzieren. Aufgabe der Unternehmensplanung ist es, basierend auf dem Zielsystem des Unternehmens Strategien zu entwickeln und Maßnahmen zu bestimmen. (Warnecke 1995, S. 71)

Wiendahl sieht die Unternehmensplanung als eine Gesamtaufgabe, die der Festlegung der Wege zur Erreichung der Unternehmensziele gilt und folgende Punkte umfasst (Wiendahl 1991, S. 20):

- Die Entscheidung in der Gegenwart unter Berücksichtigung ihrer zukünftigen Wirkungen.
- Eine systematische Festlegung von Verhaltensweisen, Maßnahmen und quantitativen Zielen für die Zukunft.
- Die Durchführung eines Entscheidungsprozesses mit dem Ziel, Entscheidungs- und Handlungsspielräume einzugrenzen und zu strukturieren.

Planung lässt sich zudem als ein Informationsverarbeitungsprozess beschreiben, der in Abbildung 6 dargestellt ist. Dieser beginnt mit der Wahrnehmung eines Problems und dessen Überführung in eine Fragestellung. Auf die Erkenntnis eines Problems erfolgt die Suche nach für die Lösung notwendigen Entscheidungsinformationen, welche Zielsetzungen, mögliche Handlungsalternativen aber auch notwendige Daten bezüglich der Konsequenzen von Entscheidungen beinhalten (Adam 1993, S. 20–22).



Phasen des Problemlösungsprozess

Abbildung 6: Allgemeiner Planungsprozess nach (Adam 1993, S. 20)

Die Fabrikplanung lässt sich als ein Teil der Unternehmensplanung betrachten, die im Wesentlichen die optimale Gestaltung und Verwirklichung von Investitionsvorhaben zum Gegenstand hat. Ziele der Fabrikplanung leiten sich aus den Unternehmenszielen ab. (Schmigalla 1995, S. 70)

VDI 5200 definiert: „Fabrikplanung ist der systematische, zielorientierte, in aufeinander aufbauende Phasen strukturierte und unter Zuhilfenahme von Methoden und Werkzeugen durchgeführte Prozess zur Planung einer Fabrik von der ersten Idee bis zum Anlauf der Produktion. Sie kann ebenso die später folgende Anpassung im laufenden Betrieb beinhalten.“ (VDI 5200 2009, Bl. 1, S. 3; Schenk et al. 2014, S. 28)

Pawellek schränkt ein, dass der Begriff der Fabrikplanung nicht eindeutig verwendet wird und je nach Anwendung als Funktion, Führungsinstrument oder auch Institution oder Abteilung gesehen wird. Definition der Fabrikplanung als Funktion ist die einer

methodischen Entscheidungsvorbereitung bei Investitionsmaßnahmen oder anstehenden Reorganisationen. (Pawellek 2014, S. 17–18)

Schenk et al. 2014 (S. 13) fordern im Zuge einer Neuausrichtung von Fabrikplanung und -betrieb eine Berücksichtigung der Energieeffizienz: *„Betrachtungen der Energieeffizienz revolutionieren die Lösungen in der Fabrikplanung und im Fabrikbetrieb. Viele derzeit noch hinsichtlich der Kosten gefundenen, optimalen' Lösungen verbieten sich zukünftig aus Gründen der Energieeffizienz.“* Dies verdeutlicht die gegenseitige Beeinflussung zwischen Unternehmens- und Fabrikplanung auf der einen Seite sowie der Energieeffizienz auf der anderen Seite.

### 2.2.2. Investitionsplanung

Die Investitionsplanung wird als Teil der Unternehmensplanung beschrieben, deren Aufgabe es ist, Investitionsmöglichkeiten zu erkennen und zu beurteilen (Schmigalla 1995, S. 70; Warnecke 1995, S. 79).

Investitionen werden als Überführung von Zahlungsmitteln (Vermögen) in langfristig gebundenes Realvermögen, (materielles) Sachvermögen oder Finanzvermögen (Anlagevermögen) betrachtet (Schmigalla 1995, S. 188; Warnecke 1995, S. 79).

Durch die Begrenztheit an finanziellen Mitteln ist eine Priorisierung von Investitionsmöglichkeiten innerhalb des Unternehmens notwendig. Ergebnis ist ein Investitionsplan für eine Planperiode, der die zur Verfügung stehenden finanziellen Mittel optimal einsetzt (Warnecke 1995, S. 80).

VDI 4433 teilt Investitionstätigkeit ebenfalls nach ihrem zeitlichen Verlauf in vier Phasen ein, benennt diese jedoch in Vor-Investitionsphase, Investitionsphase, Ab- und Inbetriebnahme sowie Projektende (VDI 4433 Blatt 1:2010-01, S. 3).

Die Phasen der Investitionsplanung können, wie in Abbildung 7 ersichtlich, unterschieden werden nach Anregungsphase, Suchphase sowie Optimierungsphase. Angeschlossen ist oftmals eine weitere Kontrollphase als Messinstrument. Weiteres Unterteilungsmerkmal nach der zugrunde liegenden Planungsbasis ist die Unterscheidung zwischen Einzelplanung und Gesamtplanung (Warnecke 1995, S. 80).



Abbildung 7: Vorgehensweise Investitionsplanung nach (Warnecke 1995, S. 81)

### 2.2.3. Investitionsbewertung und -rechnung

Die Notwendigkeit der Investitionsbewertung ergibt sich nach Warnecke aus einer Begrenztheit an Ressourcen. Durch diese müssen Investitionen bewertet und in der Regel verschiedene Alternativen abgewogen werden. Relevante Bewertungskriterien sind dabei insbesondere, aber nicht ausschließlich, wirtschaftliche Entscheidungskriterien. Technische Entscheidungskriterien befassen sich mit dem physikalischen Leistungsvermögen der Investition, im Falle von Energieeffizienzmaßnahmen etwa deren jährliche Energieeinsparung. Rechtliche Entscheidungskriterien für die Beurteilung von Investitionsalternativen können unter anderem Gesetze, Normen oder auch Patente sein (Warnecke 1995, S. 84–85).

Die Investitionsrechnung befasst sich mit der Wirtschaftlichkeitsrechnung von Investitionen. Ziel ist es, die wirtschaftlich vorteilhaftesten Investitionsobjekte auszuwählen und hierdurch eine optimale Investitionstätigkeit durchzuführen (Warnecke 1995, S. 85).

Einzuschränken ist, dass sich die Investitionsrechnung ausschließlich auf die monetäre Bewertung von Investitionen stützt. Ein Nutzen abseits von monetären Einheiten wird



nicht einbezogen. Busse von Colbe schränkt weiter ein, dass eine Monetarisierung von nicht-monetären Kriterien in vielen Fällen nicht möglich ist. Genannt werden insbesondere nachhaltigkeitsbezogenen Ziele, bei denen eine Monetarisierung zu einer Verschleierung der Wirkungszusammenhänge führen kann. (Busse von Colbe et al. 2018, S. 307–308)

Die Verfahren der Investitionsrechnung lassen sich danach gliedern, ob von sicheren oder unsicheren Erwartungen ausgegangen wird (Schmigalla 1995, S. 193–194). Grundsätzliches Unterscheidungsmerkmal ist zudem, ob sich die Methoden auf eine einzelne Periode (statisch) oder die gesamte Nutzungsdauer (dynamisch) beziehen (VDI 4433 Blatt 1: 2010-01, S. 12).

Neben Einzelinvestitionen sind Investitionsprogramme zu betrachten, bei denen simultan mehrere Investitionsobjekte mithilfe von Methoden der mathematischen Optimierung betrachtet und ausgewählt werden (Trautmann 2006, S. 6). Ausgewählte Verfahren der mathematischen Optimierung werden in Kapitel 2.3.6 betrachtet und nachfolgend ausgeklammert..

Poggensee verweist darauf, dass bei den Methoden sowohl der statischen als auch der dynamischen Investitionsrechnung jeweils singuläre Entscheidungskriterien verwendet werden (Poggensee 2011, S. 109). Verfahren mit mehrdimensionalen Zielfunktionen werden im Rahmen einer Betrachtung der Mehrzielentscheidungsfindung in Kapitel 2.3.5 betrachtet.

Abbildung 8 zeigt eine Übersicht der unterschiedlichen Verfahren der Investitionsrechnung. Ausgewählte Verfahren werden im Nachfolgenden vorgestellt.

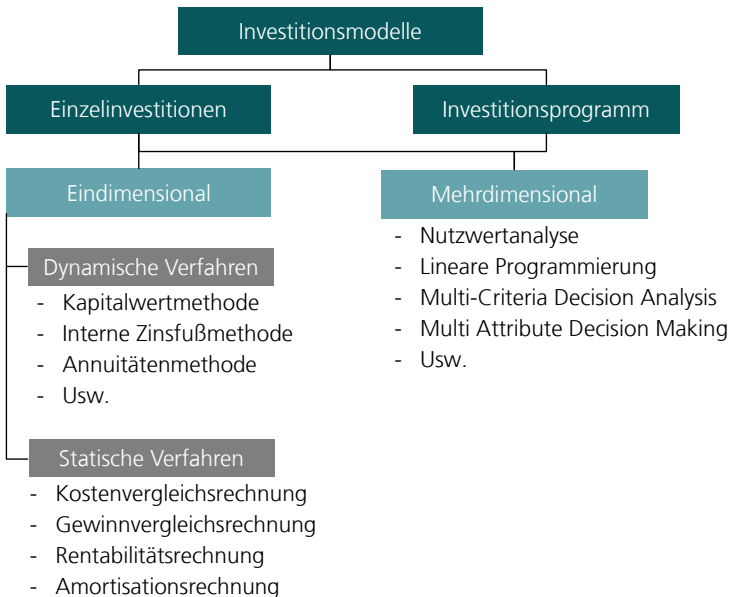


Abbildung 8: Überblick über Investitionsverfahren bei sicherer Erwartung (Grabe et al. 2014, S. 30; Trautmann 2006, S. 6)

**Statische Investitionsmodelle** sind durch einen einzelnen Zeitabschnitt charakterisiert, der eine Periode der Nutzungsdauer darstellt. Unterscheidungsmerkmal der statischen Modelle sind die betrachteten Zielgrößen, etwa Kosten, Gewinn, Rentabilität oder Amortisationszeit. (Götze 2014, S. 56–57)

Aufgrund der Reduktion auf einen einzelnen Zeitabschnitt sollten die Verfahren nicht für „bedeutsame“ Investitionen herangezogen werden (Poggensee 2011, S. 38). Relevante Verfahren werden nachfolgend vorgestellt.

Die Kostenvergleichsrechnung verwendet als Zielgröße die Kosten von Investitionen als Vergleichskriterium und vergleicht diese bei gegebenen Kapazitäten. Hierfür werden die Gesamtkosten aller Investitionsalternativen berücksichtigt, die etwa Personalkosten, Materialkosten, Abschreibungen und Zinsen umfassen. Diese Gesamtkosten werden als Durchschnittsgröße für den Planungszeitraum ermittelt (Ermschel 2013, S. 35; Götze 2014, S. 57–58; Poggensee 2011, S. 53–54). Nach Götze gilt: „Ein Investitionsobjekt ist

*absolut vorteilhaft, falls seine Kosten geringer sind als die der Unterlassensalternative“* (Götze 2014, S. 57–58). Kritik am Verfahren liegt in einer fehlenden Betrachtung von Erlösen, der vereinfachten statischen Auslegung des Modells, bei der keine zeitlichen Unterschiede beim Anfall der Kosten berücksichtigt werden, sowie der Annahme von gleich bleibenden Kapazitätsauslastungen (Poggensee 2011, S. 54).

Bei der Gewinnvergleichsrechnung werden in einer Erweiterung der Kostenvergleichsrechnung Erlöse einbezogen. Zielgröße ist der durchschnittliche Gewinn als Ergebnis der Differenz zwischen Erlösen und Kosten. Unterschieden wird zwischen einer absoluten und einer relativen Vorteilhaftigkeit von Investitionen. Bei einem Gewinn größer null wird von einer absoluten Vorteilhaftigkeit gesprochen, bei einem höheren Gewinn im Vergleich zu einer anderen Investitionsalternative wird von einer relativen Vorteilhaftigkeit gesprochen (Ermschel 2013, S. 41–42; Götze 2014, S. 65). Die Bewertung des Verfahrens ist ähnlich der Kostenvergleichsrechnung mit Ausnahme der nun zusätzlichen Berücksichtigung von Erlösen (Poggensee 2011, S. 66).

Die Rentabilitätsrechnung ermittelt eine Verhältniszahl, bei der *„[...] eine periodische Erfolgsgröße zum durchschnittlich gebundenen Kapital ins Verhältnis gesetzt“* wird (Poggensee 2011, S. 76). Die Formel für die Rentabilität lautet (Poggensee 2011, S. 76):

$$\text{Rentabilität} = \frac{\text{Gewinn}}{\text{durchschnittlichgebundenesKapital}} \quad (2.1)$$

Die absolute Vorteilhaftigkeit ergibt sich durch einen frei festgesetzten Grenzwert, die relative Vorteilhaftigkeit, wenn die Rentabilität höher als die einer Investitionsalternative ist (Götze 2014, S. 68). In der Literatur wird auf unterschiedliche Definitionen und Ermittlungen der Rentabilität verwiesen, weshalb von verschiedenen Rentabilitäten gesprochen werden muss (Poggensee 2011, S. 77).

Weiteres Verfahren der statischen Investitionsrechnungsverfahren ist die statische Amortisationsrechnung. Diese *„[...] ermittelt die Anzahl von Perioden, gemessen in Jahren, nach denen aus den Rückflüssen der einzelnen Jahre ohne Beachtung von Zinsen das ursprünglich eingesetzte Kapital wiedergewonnen ist“* (Poggensee 2011, S. 89).

Die Formel der Amortisationszeit lautet (Götze 2014, S. 71):

$$\text{Amortisationszeit} = \frac{\text{eingesetztes Kapital}}{\text{durchschnittliche Rückflüsse}} \quad (2.2)$$

Die absolute Vorteilhaftigkeit eines Investitionsobjekts ergibt sich, falls diese geringer als ein selbst gewählter Grenzwert ist. Die relative Vorteilhaftigkeit ergibt sich, wenn die Amortisationszeit geringer als die der betrachteten Alternativen ist. (Götze 2014, S. 71)

Charakterisierend für **dynamische Investitionsmodelle** ist die Berücksichtigung mehrerer Perioden. Die betrachteten Investitionen beinhalten Ein- und Auszahlungen, die bei ihrer Umsetzung im Zeitverlauf erwartet werden. Aufgrund der Abhängigkeit der Zeit werden in der Regel Auf- oder Abzinsungen der Zahlungsströme mit einem bestimmten Zinssatz vorgenommen. (Götze 2014, S. 73–74; Poggensee 2011, S. 92–94)

Dynamische Verfahren beruhen nach Poggensee auf drei Rechelementen: die Höhe der Zahlungen, die Länge der Nutzungsdauer sowie die Höhe des Zinssatzes. Die Literatur verweist auf die Bedeutung der Festlegung der drei Kriterien, die einen Großteil der erforderlichen Arbeitszeit der Investitionsrechnung in Anspruch nehmen sollte. (Poggensee 2011, S. 115)

Weiteres Unterscheidungsmerkmal der dynamischen Verfahren ist, ob von einem einheitlichen kalkulatorischen Zinssatz ausgegangen wird oder unterschiedliche Zinssätze für die Aufnahme und Anlage von finanziellen Mitteln verwendet werden (Götze 2014, S. 77). Im weiteren Verlauf werden ausschließlich Verfahren mit einem einheitlichen Zinssatz vorgestellt.

Die innerhalb der Vorstellung verwendeten Variablenbezeichnungen sind nachfolgend ersichtlich und stimmen mit der Verwendung nach Poggensee überein (Poggensee 2011, S. 115):

$A$  = Höhe der Anschaffungsauszahlung

$R$  = Höhe des Restwertes

$e_t$  = Höhe der laufenden Einzahlung der Periode  $t$

$a_t$  = Höhe der laufenden Auszahlung der Periode  $t$

$n$  = die Länge der Nutzungsdauer

$i = \text{Höhe des Kalkulationszinssatzes}$

$t = \text{Zeitindex}$

$T = \text{letzter Zeitpunkt, in dem Zahlungen anfallen}$

Im Zuge einer einheitlichen Verwendung wurden die Formeln der vorgestellten Verfahren teilweise auf diese Bezeichnungen angepasst und unterschiedliche Formelschreibweisen konsolidiert. Vorgestellt werden nachfolgend die wichtigsten vier Verfahren der dynamischen Ansätze (Heesen 2010, S. 31).

Die **Kapitalwertmethode** geht von einem einheitlichen Zinssatz aus, der für die Auf- und Abzinsung verwendet wird. In der Praxis werden häufig alle Zahlungen auf den Beginn des Planungszeitraums bezogen. Wenn dies der Fall ist, entspricht der Kapitalwert der „[...] Summe aller auf diesen Zeitpunkt abgezinsten Zahlungen, die durch ein Investitionsobjekt bewirkt werden“. (Götze 2014, S. 78)

Mit nachfolgender Formel lässt sich der Kapitalwert bestimmen, wobei  $q^{-t}$  der Abzinsungsfaktor zum Zeitpunkt  $t$  ist (Götze 2014, S. 79; Heesen 2010, S. 33):

$$KW = \sum_{t=0}^T (e_t - a_t) q^{-t} \quad (2.3)$$

Die absolute Vorteilhaftigkeit eines Investitionsobjekts ist gegeben, wenn der Kapitalwert größer als null ist. Es wird auf die Eigenschaft der absoluten Vorteilhaftigkeit der Kapitalwertmethode verwiesen, dass ein höherer positiver Kapitalwert nicht zwingend besser als ein geringerer positiver Kapitalwert ist (Poggensee 2011, S. 126). Im Falle einer Einzelentscheidung muss für einen relativen Vergleich etwa eine Differenzinvestition betrachtet werden, die Investitionsobjekte hinsichtlich der Höhe der Anschaffungsauszahlung und der Länge der Nutzungsdauer vergleichbar macht (Poggensee 2011, S. 199). Als Nachteil der Methode wird die sehr starke Abhängigkeit der Wirtschaftlichkeit einer Investition von dem verwendeten kalkulatorischen Zinssatz genannt (Heesen 2010, S. 32).

Die **Annuitätenmethode** betrachtet als Entscheidungskriterium den durchschnittlichen jährlichen Überschuss, der den Wert des Investitionsobjekts über die Laufzeit widerspiegelt (Poggensee 2011, S. 145). Bei einer Annuität handelt es sich um regelmäßige und gleichbleibende Zahlungen, wobei im Rahmen der Annuitätenmethode der Kapitalwert einer Investition auf deren Projektdauer verteilt wird (Heesen 2010, S. 61). Die Annuität ist demnach „[...] eine Folge gleich hoher Zahlungen, die in jeder Periode des Betrachtungszeitraums anfallen“ (Götze 2014, S. 101).

Die Berechnung der Annuität erfolgt über nachfolgende Formel (Götze 2014, S. 101; Heesen 2010, S. 65):

$$\text{Annuität} = \text{Kapitalwert} \frac{(1+i)^T i}{(1+i)^T - 1} \quad (2.4)$$

Die Annuitätenmethode liefert sowohl ein absolutes als auch ein relatives Entscheidungskriterium. Ein Investitionsobjekt ist bei einer Annuität größer null absolut vorteilhaft, eine relative Vorteilhaftigkeit ist gegeben, wenn die Annuität höher als die eines Vergleichsobjekts ist. (Götze 2014, S. 101)

Als Vorteil der Annuitätenmethode gegenüber der Kapitalwertmethode wird die höhere Interpretierbarkeit der Zielgröße genannt, die sich als Durchschnittsgewinn interpretieren lassen kann (Götze 2014, S. 103).

Die **interne Zinsfußmethode** ermittelt den Zinssatz, bei dem Kapitalwert und Annuität null sind (Heesen 2010, S. 67). Der Zinssatz wird hierzu als abhängige Variable verändert, bis die Zielwerte null werden (Götze 2014, S. 154–155). Die Berechnung des internen Zinssatzes  $i$  erfolgt über folgende Formel (Götze 2014, S. 106):

$$KW = \sum_{t=0}^T (e_t - a_t)(1+i)^{-t} = 0 \quad (2.5)$$

Mit Ausnahme von wenigen Sonderfällen, etwa für eine Periodenanzahl kleiner als vier, werden für die Ermittlung des internen Zinssatzes Näherungsverfahren verwendet (Götze 2014, S. 107). Bekannt ist die Annäherung mithilfe der sogenannten „Regula-Falsi-Gleichung“ (Heesen 2010, S. 68).

Das Verfahren besitzt sowohl eine absolute Vorteilhaftigkeit als auch eine relative. Die absolute ist gegeben, wenn der interne Zinssatz größer des Kalkulationszinssatzes ist, die relative, wenn der interne Zinssatz größer als der eines Vergleichsobjektes ist (Götze 2014, S. 104; Poggensee 2011, S. 128–129). Die Differenz zwischen Zinsfuß und Kalkulationszins wird als Investitionsmarge bezeichnet (Heesen 2010, S. 67).

Es verbleibt die Vorstellung der **dynamischen Amortisationszeit**. Diese ermittelt die Amortisationszeit im Rahmen des Modells der Kapitalwertmethode (Götze 2014, S. 114). Sie entspricht der Dauer, nach der ein Kapitalwert von null erreicht wird (Heesen 2010, S. 50). Häufig wird auch der Ausdruck „Break Even“ verwendet, der wie folgt definiert ist (Heesen 2010, S. 49): *„Es handelt sich dabei um den Zeitpunkt, zu dem das investierte Kapital zuzüglich einer Verzinsung in Höhe des Kalkulationszinsfußes wieder aus den Rückzahlungen des Projektes gewonnen wurde, es sich also amortisiert hat.“*

Innerhalb des Verfahrens stellt die Nutzungsdauer eine endogene Variable dar, die verändert wird, bis die Zielwerte der Kapitalwertmethode und der Annuitätenmethode null sind (Poggensee 2011, S. 166). Die Berechnung erfolgt ähnlich dem internen Zinsfuß durch Nullsetzen des Kapitalwertes (Poggensee 2011, S. 168):

$$0 = \sum_{k=1}^{n_{dyn}} (e_k - a_k) (1 + i)^{-k} + R (1 + i)^{-n_{dyn}} - A \quad (2.6)$$

Die **Investitionsprogrammplanung** befasst sich mit der simultanen Entscheidung über Art und Zahl unterschiedlicher Investitionsobjekte. Mögliche Zielgrößen sind der Kapitalwert, aber auch der Vermögensendwert oder periodische Entnahmen. Unterschiedliche Modellgruppen unterscheiden sich darin, ob sie zusätzlich Finanzierungsmöglichkeiten betrachten. (Götze 2014, S. 309–310)

Der Zeitaspekt stellt ein weiteres Differenzierungsmerkmal der unterschiedlichen Modelle dar. So sind in Summe folgende Modelle zu unterscheiden (Götze 2014, S. 310):

- Statische Modelle, bei denen der Planungszeitraum aus einer Periode besteht.
- Einstufige Modelle, bei denen verschiedene Planungsperioden betrachtet werden, Handlungen jedoch nur zu Beginn möglich sind.

- Mehrstufige Modelle, bei denen Handlungen in verschiedenen Perioden des Planungshorizonts möglich sind.

Götze präsentiert ein **Modell zur Bestimmung des optimalen Investitionsprogramms bei vorgegebenem Kapitalbudget und Produktionsprogramm**. Basis des Modells ist die Optimierung des Gesamtkapitalwerts des Investitionsprogramms. Wichtige Grundannahmen des Modells lauten (Götze 2014, S. 312):

- Vorhandene Investitionsobjekte schließen sich nicht gegenseitig aus.
- Finanzielle Mittel können nicht unbegrenzt zum Kalkulationszins aufgenommen werden.
- Investitionen können unabhängig voneinander durchgeführt werden.
- Es liegt eine Entscheidung unter Sicherheit vor.
- Das Investitionsprogramm ist für den Beginn des Planungszeitraums zu bestimmen.

Mathematisch lässt sich das so definierte Modell als gemischtganzzahliges lineares Optimierungsproblem in folgender Form repräsentieren (Götze 2014, S. 312; Runzheimer 1998, S. 3–4):

$$\sum_{j=1}^J c_j x_j \Rightarrow \max! \quad (2.7)$$

Der Kapitalwert eines Investitionsobjekts  $j$  wird durch  $c_j$  dargestellt. Die Binärvariable  $x_j$  gibt an, ob ein Investitionsobjekt realisiert wird oder nicht:

$$x_j \begin{cases} 1 & \text{wenn Investitionsobjekt realisiert wird} \\ 0 & \text{wenn Investitionsobjekt nicht realisiert wird} \end{cases}, \quad j = 1, \dots, J$$

Der Gesamtkapitalwert kann maximiert werden, indem die Kapitalwerte der einzelnen Objekte mit den Binärvariablen der Realisierung verknüpft werden. Die Begrenzung des verfügbaren Investitionsbudgets wird in Form einer Nebenbedingung modelliert:



$$\sum_{j=1}^J A_{0j} x_j \leq \text{Kapitalbudget} \quad (2.8)$$

Die Bedingung einer simultanen Entscheidung wird durch die Projektbedingung dargestellt:

$$x_j \in \{0,1\} \forall j$$

Götze verweist in der Modellbesprechung auf die Kapitalwertmethode, deren Vor- und Nachteile aufgrund der hohen Überschneidung noch immer Gültigkeit besitzen. Zu beachten ist die Modelleigenschaft einer nur vollständigen Umsetzung von Projekten. Eine teilweise Umsetzung ist in Form einer ganzzahligen Modellierung nicht möglich. (Götze 2014, S. 313–314). Oftmals werden Probleme der Art auch als 0-1-Programmierung bezeichnet, wodurch der binäre Charakter der Entscheidungsvariablen verdeutlicht wird (Runzheimer 1998, S. 8).

Für die simultane Investitions- und Finanzierungsplanung kann das **Modell von Dean** verwendet werden. Bei diesem wird ähnlich zu dem Modell zuvor von einer einzigen relevanten Planungsperiode ausgegangen und das Modell dahingehend erweitert, dass der Umfang der Inanspruchnahme der Finanzierung variabel ist. Zielsetzung des Modells ist die Maximierung des Vermögensendwertes. (Götze 2014, S. 316)

Mathematisch wird folgende Zielfunktion verwendet (Götze 2014, S. 316):

$$\sum_{j=1}^J a_{j1} x_j + \sum_{i=1}^I d_{i1} y_i \Rightarrow \max! \quad (2.9)$$

Die Variablen beziehen sich auf die Zahlungen der Investitions- und Finanzierungsobjekte:

$a_{jt}$  = Nettozahlung je Einheit des Investitionsobjekts  $j$  im Zeitpunkt  $t$  ( $t = 0,1$ )

$d_{it}$  = Nettozahlung je Einheit des Finanzierungsobjekts  $i$  im Zeitpunkt  $t$  ( $t = 0,1$ )

Die beiden Zeitpunkte  $t = 0$  und  $t = 1$  lassen sich interpretieren als das zeitliche Anfallen der Anschaffungskosten ( $t = 0$ ) sowie dem Erhalt der Auszahlungen ( $t = 1$ ).

Finanzierungsobjekte können als verschiedene Kredite mit unterschiedlichen Konditionen betrachtet werden.

Nebenbedingung des Modells ist die Einhaltung der Finanzierungsbedingung in  $t = 0$ :

$$\sum_{j=1}^J a_{j1} x_j + \sum_{i=1}^I d_{i1} y_i = 0 \quad (2.10)$$

Die Projektbedingung lautet:

$$0 \leq x_j \leq 1, \text{ für } j=1, \dots, J$$

$$0 \leq y_i \leq 1, \text{ für } i=1, \dots, I$$

Durch eine fehlende Ganzzahligkeitsbedingung können die Investitions- und Finanzierungsobjekte in Bruchteilen bis zum maximalen Gesamtumfang realisiert werden.

#### 2.2.4. Praxis in der Investitionsbewertung von Energieeffizienzmaßnahmen

Für die Investitionsbewertung von Energieeffizienzmaßnahmen wird die Verwendung von dynamischen Verfahren, insbesondere der Kapitalwertmethode, empfohlen (Müller et al. 2009, S. 331). Im Rahmen der energieeffizienzorientierten Fabrikplanung sehen Müller et al. in dieser sogar „[...] wichtige Stellhebel für die Durchsetzung von mehr Energieeffizienz“ (Müller et al. 2009, S. 331). Weitere Autoren sehen in der unternehmerischen Praxis einen zu hohen Fokus auf die Amortisationszeit und schlagen ebenfalls die Verwendung des Kapitalwertes als Bewertungskriterium vor (Banks et al. 2012; Killip et al. 2019, S. 74–75).

Für die Berechnung des Kapitalwerts hebt Nissen hervor, dass „[...] *Energiekosteneinsparung als periodenweise zustande kommender Ertrag und damit als Zahlungsstrom (der aufgrund der i.d.R. zu unterstellenden Energiepreissteigerungsrate kontinuierlich ansteigt) aufzufassen und dementsprechend zu berücksichtigen*“ (Nissen 2018, S. 5).

Einzelne ältere Untersuchungen zeigen, dass 80 % der Unternehmen die Amortisationszeit als primäres Verfahren der Investitionsbewertung verwenden, gefolgt

von der Rentabilität mit 50 % sowie dem Kapitalwert mit 30 % (Banks et al. 2012, S. 25; Harris et al. 2000).

In Bezug auf die ökonomische Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen ergeben sich einige spezifische Eigenschaften, die in der Literatur im Rahmen des Energiecontrollings hervorgehoben werden. So wird in Bezug auf die betrachteten Perioden bei der Investitionsrechnung eine „*vergleichsweise einfache Festlegung*“ vorgeschlagen, die sich etwa an der Nutzungsdauer oder Abschreibungsdauer orientiert (Gleich 2014).

Das Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) schlägt die Verwendung der technischen Nutzungsdauer nach VDI 2067 vor, wobei Energieeffizienzmaßnahmen ggf. als Anlagen beschrieben werden können. Alternativ wird auf die Verwendung von AfA-Zeiträumen verwiesen, wobei für die konkrete Festlegung der Abschreibungszeiträume auf relevante Tabellen des Bundesministeriums für Finanzen verwiesen wird (Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle 2020, S. 35–36). Diese sind nach Wirtschaftszweigen geordnet auf der Homepage des Bundesministeriums für Finanzen ersichtlich (Bundesministeriums für Finanzen 2021).

Bezüglich des kalkulatorischen Zinssatzes verweist der Leitfaden zur Erstellung von Energieauditberichten nach den Vorgaben der DIN EN 16247-1 auf eine hohe Bandbreite, nach der Unternehmen Investitionen in die Energieeffizienz Stand 2018 mit einem Zinssatz zwischen 7 und 10 % bewerten. Für Investitionen in Energieeffizienzmaßnahmen wird als mögliche Alternative eine Verzinsung anhand von „Greenbonds“ vorgeschlagen, für die eine Bandbreite von 0,375 – 4,5 % genannt wird (Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle 2020, S. 36). In Summe zeigt sich hier eine hohe Bandbreite der möglichen kalkulatorischen Zinssätze.

### 2.3. Entscheidungstheorie

Ausgangspunkt der **Entscheidungstheorie** ist die Beobachtung, dass Menschen im Alltag häufig Entscheidungen von hoher Bedeutung zu treffen haben. Hierdurch hat sich der interdisziplinäre Forschungsschwerpunkt der Entscheidungstheorie entwickelt, der sich mit dem Entscheidungsverhalten von Individuen und Gruppen befasst. (Laux 2014, S. 3)

Der Begriff der **Entscheidung** selbst ist in der Entscheidungstheorie als die Auswahl einer oder mehrerer Handlungsalternativen definiert (Laux 2014, S. 3). Ausschlaggebend für das Vorliegen von Entscheidungsproblemen ist die für Unternehmen bereits in Kapitel 2.2.3 beschriebene Begrenztheit von Gütern, die erst eine Entscheidung notwendig macht (Göbel 2014, S. 30). Ziel der Entscheidungstheorie ist es, durch ein rationales Vorgehen die Erfolgsaussichten von Entscheidungen zu verbessern (Eisenführ et al. 2003, S. 1).

Ein **Entscheidungsproblem** oder auch eine Entscheidungssituation ist durch das Vorhandensein von mindestens zwei Alternativen charakterisiert, zwischen denen wenigstens ein Entscheidungsträger eine Entscheidung treffen kann oder muss (Dinkelbach et al. 1996, S. 1).

Göbel hebt hervor, dass die **präskriptive Entscheidungstheorie** vorgibt, wie rationale Akteure entscheiden sollten. Im Gegensatz dazu versucht die **deskriptive Entscheidungstheorie** zu beschreiben, wie in der Realität Entscheidungen getroffen werden (Göbel 2014, S. 29). Fokus der Arbeit ist demnach die präskriptive Entscheidungstheorie.

Die Entscheidungstheorie ist eng verbunden mit **Entscheidungsunterstützungssystemen**, deren Ziel die Unterstützung von betrieblichen Entscheidungsträgern in semistrukturierten Problemsituationen ist (Werner 1992, S. 41–42). Wichtige Eigenschaft ist, dass eine Entscheidungsunterstützung geliefert wird, dem Entscheidungsträger aber nicht vorgeschrieben wird, wie eine Entscheidung letzten Endes zu treffen ist, da dieser in letzter Instanz noch immer die Verantwortung für die Entscheidung trägt (Keen 1987, S. 257). Als Vorläufer der Entscheidungsunterstützungssysteme werden betriebliche Informationssysteme gesehen (Werner 1992, S. 3).

### 2.3.1. Rationalität

Göbel verweist auf „*lange und kontroverse*“ Diskussionen in der Wissenschaft, die zu unterschiedlichen Rationalitätsbetrachtungen geführt haben (Göbel 2014, S. 36).

Eisenführ sieht in der Entscheidungstheorie ein Streben nach möglichst rationalen Entscheidungen und schränkt direkt ein, dass Entscheidungen in der Regel nicht binär als rational oder irrational bezeichnet werden können, sondern in der Regel ein „*mehr oder weniger rational*“ vorliegt. Eine Betrachtung von Erfolg oder Misserfolg der Entscheidung sei zudem kein Maßstab für deren Rationalität, da Entscheidungen in der Regel Unsicherheiten unterliegen. Er verneint deshalb die Existenz einer Rationalität im Sinne einer objektiven und beweisbaren Eigenschaft. (Eisenführ et al. 2003, S. 4–5)

Ein Überblick über die Vielzahl von Definitionen der Rationalität wird von Meyer präsentiert, wobei diese trotz aller Unterschiedlichkeiten die Erreichung oder Maximierung einer Zielgröße als Gemeinsamkeiten aller Definitionen sieht (Meyer 2000, S. 7–10).

Zu unterscheiden ist zwischen unterschiedlichen Begriffen der Rationalität (Göbel 2014, S. 36):

- Im Sinne einer **formalen Rationalität** besitzt ein Entscheider<sup>1</sup> ein Zielsystem und entscheidet sich gemäß diesem Zielsystem für die beste Alternative.
- In Sinne der **substanziellen Rationalität** wird ein bestimmtes Ziel als richtig vorausgesetzt und Aktionen im Hinblick auf dieses bewertet.

Andere Entscheidungstheoretiker sprechen von einer **subjektiven Rationalität**, bei der ein Entscheidungsträger gemäß seinem individuellen Entscheidungsmodell optimal entscheidet, und unterscheiden diese von der **objektiven Rationalität**, bei der der Entscheider ein objektiv „richtiges“ Entscheidungsfeld abbildet, wie dies ein „*kundiger, objektiver Beobachter machen würde*“. (Göbel 2014, S. 37)

Von Bedeutung ist der Prozess, der zu einer Entscheidung führt, die sogenannte **prozedurale Rationalität**, bei der ein Entscheidungsprozess „*bewusst und in einer rationalen Art und Weise*“ durchgeführt wird (Göbel 2014, S. 38–39). Die einzelnen Schritte dieses Prozesses werden nachfolgend vorgestellt und orientieren sich an der

---

<sup>1</sup> Der Begriff Entscheider wird im Weiteren geschlechtsneutral verwendet und schließt alle Geschlechter mit ein.

Darstellung von Göbel, wobei an einzelnen Punkten auch die Sichtweisen weiterer Autoren ergänzt werden (Göbel 2014, S. 38–39):

Im ersten Schritt der prozeduralen Rationalität erfolgt eine **Dekomposition**. Diese beinhaltet als Komponenten Zielbestimmung, Problemauswahl, Bestimmung von Alternativen und Bewertung von Entscheidungen (Göbel 2014, S. 39). Eisenführ sieht hier auch eine Auswahl des „*richtigen*“ Problems aus der Gesamtmenge der vorhandenen Probleme und erkennt ebenfalls eine oftmalige Aufspaltung in kleinere Teilprobleme (Eisenführ et al. 2003, S. 5).

Nach Göbel ergibt sich eine **Reihenfolge für die Durchführung eines idealen Entscheidungsprozesses** bestehend aus folgenden Schritten (Göbel 2014, S. 39):

1. Ziel- und Problemdefinition inklusive Nebenbedingungen.
2. Bestimmung von Entscheidungsalternativen (Alternativen) und der relevanten Entscheidungskriterien (Bewertungskriterien).
3. Bereitstellung der entscheidungsrelevanten Informationen durch die Wirkungen der Alternativen.
4. Bewertung durch Berechnung von Zielwerten oder Nutzen der Zielerträge.
5. Festlegung von Entscheidungsregeln.
6. Entscheidung.

Weitere Forderung der prozeduralen Rationalität ist die einer **Konsistenz**. Die Anforderungen der Konsistenz beinhalten eine Zukunftsorientierung, bei der die Wahl einer Alternative nur von zukünftigen Ergebnissen und nicht von vergangenen Entscheidungen abhängt. Die Anforderung der Transitivität ist gewährleistet, „[...] wenn der Entscheider *a* gegenüber *b* vorzieht und *b* gegenüber *c*, dann sollte er auch *a* gegenüber *c* vorziehen“ (Göbel 2014, S. 40). Weitere Anforderung im Sinne der Konsistenz ist die einer Invarianz gegenüber verschiedenen Ergebnispräsentationen und einer Unabhängigkeit von irrelevanten Alternativen. Nach dieser ist die Präferenz von *a* gegenüber *b* unabhängig von der Existenz einer weiteren Alternative *c*. (Eisenführ et al. 2003, S. 7)

Letzte Anforderung ist die der **Transparenz**, die auf eine „*größtmögliche Transparenz der Entscheidungsgrundlage*“ verweist, um Entscheidungen nachvollziehen, aber auch kritisieren zu können. Erst durch einen transparenten Entscheidungsprozess ist es demnach möglich, aus Fehlern zu lernen (Göbel 2014, S. 41).

### 2.3.2. Entscheidungsmodelle

Nachfolgend wird die grundlegende Strukturierung von Entscheidungsmodellen vorgestellt und einzelne Bestandteile genauer beleuchtet.

Ein Entscheidungsmodell lässt sich wie folgt beschreiben (Eisenführ et al. 2003, S. 16): Der Entscheider steht vor einer Anzahl von Handlungsalternativen, zwischen denen er wählen kann. Umwelteinflüsse beeinflussen die Entscheidung, können aber nicht vom Entscheider selbst beeinflusst werden. Durch die Wahl der Handlungsalternative wird bestimmt, welcher Umweltzustand eintritt, wobei das Ergebnis nicht unmittelbar bekannt sein muss. Zudem existiert ein Wirkmodell basierend aus Zielen und Präferenzen des Entscheiders, welches aus Entscheidungs- und Ereignisvariablen die Ausprägung der Ergebnisse bestimmt.

Die grundlegenden Komponenten eines Entscheidungsmodells sind (Göbel 2014, S. 43; Laux 2014, S. 30 ff.; Rommelfanger et al. 2002, S. 12):

Der **Aktionsraum**  $A$ , alternativ auch Aktionsraum, bestehend aus den dem Entscheidungsträger zur Verfügung stehenden Aktionen (Alternativen, Entscheidungsvariablen, Strategien), z. B. die Menge an zur Verfügung stehenden Energieeffizienzmaßnahmen. Der Aktionsraum enthält die dem Entscheider offenstehenden Aktionen, wobei diese Einzelmaßnahmen oder Maßnahmenbündel sein können, bzw. deren Kombination (Göbel 2014, S. 43-44). Die Aktionen repräsentieren demnach Variablen, die vom Entscheider direkt oder indirekt beeinflussbar sind (Eisenführ et al. 2003, S. 16). Die endliche Menge der Alternativen wird mit  $A = \{a_1, a_2, \dots, a_{N_A}\}$  bezeichnet, wobei für eine beliebige Alternative aus der Menge  $A$  das Symbol  $a_a$  verwendet wird.  $N_A$  bezeichnet die Anzahl der zur Verfügung stehenden Aktionen.

Die Konsequenzen einer Alternative werden über **Ergebnisse** abgebildet. Für den Vergleich verschiedener Alternativen werden diese durch für den Entscheider relevante Ausprägungen bewertet, die als Zielgrößen bezeichnet werden. Nach Laux wird die Wertekonstellation der Zielgrößen als Ergebnis bezeichnet. Dies können einzelne oder auch mehrere Zielgrößen sein (Laux 2014, S. 31–32).

Bei mehreren Zielgrößen ist das Ergebnis  $x_a$  abhängig von allen Zielgrößen der Alternative  $A_a$  und entspricht dem Vektor der Ausprägungen:  $x_a = [Z_{a1}, Z_{a2}, \dots, Z_{aN_z}]$ . Dabei bezeichnet  $Z_{az}$  den Wert der Zielgröße  $Z_z$  ( $z = 1, 2, \dots, N_z$ ) bei der Wahl der Alternative  $A_a$  ( $a = 1, 2, \dots, N_a$ ) (Laux 2014, S. 58–59).

Die vom Entscheider nicht beeinflussbaren Zustände, die das Ergebnis einer Alternative beeinflussen, werden als Umweltzustände bezeichnet (Laux 2014, S. 32). Der **Zustandsraum**  $S$  stellt die Umweltzustände dar. Die Menge der Umweltzustände wird mit  $S = \{s_1, s_2, \dots, s_{N_s}\}$  bezeichnet, wobei  $N_s$  die Anzahl der Umweltzustände repräsentiert (Göbel 2014, S. 46–47).

Die „**Entscheidungsregel** legt fest, wie im Rahmen eines Entscheidungsmodells aus einer Alternativenmenge ausgewählt wird, um dieses Ziel zu erreichen“ (Laux 2014, S. 34). Bestandteile sind eine **Präferenzfunktion**, welche jeder Aktion eine reelle Zahl, den Präferenzwert, zuordnet  $\Phi(A_a) \in \mathbb{R}$ , sowie ein **Optimierungskriterium**, wobei in der Regel von der Maximierungsvorschrift ausgegangen wird. In diesem Fall lautet die Entscheidungsregel  $\Phi(a) \rightarrow \max_{a \in A}!$  (Laux 2014, S. 34).

Durch die Anwendung der Entscheidungsregel soll die Alternative ermittelt werden, die die Ziele des Entscheidungsträgers bestmöglich erfüllt. Laux hebt dabei hervor, dass die Wahl der Präferenzfunktion  $\Phi$  vom Entscheidungsträger selbst festgelegt werden muss, und bezeichnet dies als ein Meta-Entscheidungsproblem (Laux 2014, S. 35).

Die zuvor vorgestellten Basiselemente eines Entscheidungsmodells sind zusammengefasst in Abbildung 9 ersichtlich.



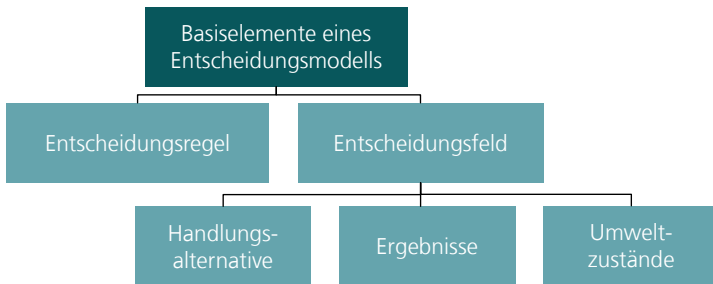


Abbildung 9: Basiselemente eines Entscheidungsmodells (Laux 2014, S. 30)

### Der Entscheidungsfindungsprozess

Der Entscheidungsfindungsprozess lässt sich als Analyse eines Entscheidungsproblems darstellen. Zunächst entwickelt der Entscheidungsträger eine Menge an Handlungsalternativen und eine darauf aufbauende Zielfunktion, die in der Regel maximiert werden soll. Sowohl Laux als auch Dinkelbacher heben hervor, dass dadurch die Allgemeinheit der Darstellungen nicht eingeschränkt wird, da eine zu minimierende Zielfunktion durch Multiplikation mit  $-1$  in eine zu maximierende Zielfunktion umgeformt werden kann (Dinkelbach et al. 1996, S. 19; Laux 2014, S. 34).

Um die optimale Lösung im Sinne eines maximalen Zielfunktionswertes zu ermitteln, können geeignete Optimierungsverfahren verwendet werden, etwa Verfahren der linearen oder nichtlinearen Optimierung (Dinkelbach et al. 1996, S. 21). Dabei können weitere Nebenbedingungen berücksichtigt werden, die üblicherweise in Form von Ungleichungssystemen vorliegen (Dinkelbach et al. 1996, S. 9).

Für die Entwicklung eines Entscheidungsmodells im Rahmen eines Entscheidungsprozesses wurde in der Literatur eine Systematik bestehenden aus nachfolgenden Schritten entwickelt (Laux 2014, S. 12):

1. Problemformulierung,
2. Präzisierung des Zielsystems,
3. Erforschung der möglichen Handlungsalternativen,
4. Auswahl einer Alternative,

#### 5. Entscheidungen in der Realisationsphase.

Laux schränkt jedoch ein, dass die einzelnen Phasen nicht strikt zu trennen sind und „enge Interdependenzen“ zwischen diesen bestehen, durch die eine isolierte Betrachtung nicht sinnvoll ist.

#### 2.3.3. Klassifikation

Wenn die Ergebnisse von Entscheidungen unmittelbar bestimmt werden können, d.h. eine **Entscheidung unter Sicherheit** vorliegt, ist es nicht notwendig, die Umweltzustände im Entscheidungsmodell abzubilden. Als Beispiel für eine Entscheidung unter Sicherheit nennt Meyer 2000 (S. 25) die betriebswirtschaftliche Problemstellung der Gewinnmaximierung, die unter der Annahme vollkommener Information mithilfe der linearen Programmierung optimal gelöst werden kann. Der Entscheidungsträger kann also exakt ermitteln, welches Ergebnis (Gewinn) sich bei einer Handlungsalternative (Mengenkombination der Produkte) ergibt. Nach Göbel wird häufig in der Praxis vereinfachend von Entscheidungen unter Sicherheit ausgegangen (Göbel 2014, S. 48).

Wenn bei der Entscheidung alternative Umweltzustände einbezogen werden, handelt es sich um eine **Entscheidung unter Unsicherheit**. Wenn deren Eintrittswahrscheinlichkeiten bekannt sind, handelt es sich um eine **Entscheidung unter Risiko**. Meyer hebt hierbei hervor, dass es sich um objektive oder subjektive zugeordnete Wahrscheinlichkeiten handeln kann. Falls diese nicht bekannt sind, handelt es sich um eine **Entscheidung unter Ungewissheit** (Göbel 2014, S. 50; Meyer 2000, S. 18).

Die so entstehende Kategorisierung von Entscheidungen ist in Abbildung 10 ersichtlich.

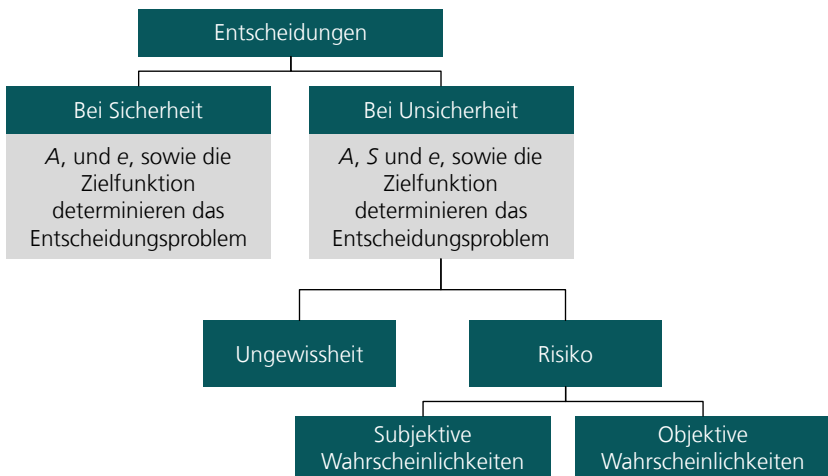


Abbildung 10: Kategorisierung von Entscheidungen (Meyer 2000, S. 18)

Aufgrund der weiteren Unterteilung der einzelnen Kategorien, etwa in Bezug auf die Anzahl der betrachteten Ziele, wird auf eine weitere Vorstellung der Entscheidungsfindung unter Unsicherheit verzichtet. Für weitere Betrachtungen sei auf Standardliteratur verwiesen (Amann 2019, S. 25; Laux 2014, S. S. 94 ff.; Rommelfanger et al. 2002, S. 49 ff.).

Üblicherweise wird von der Existenz eines einzelnen Entscheiders ausgegangen, in der Literatur wird jedoch darauf hingewiesen, dass auch sogenannte Gruppenentscheidungen mit mehr als einem Akteur vorliegen können (Göbel 2014, S. 59–60). Diese werden etwa in der **Spieltheorie**, deren Grundsteine durch Neumann und Morgenstern gelegt wurden (Neumann et al. 2007), **Gruppenentscheidungen** sowie der **Theorie der sozialen Entscheidungen** betrachtet (Göbel 2014, S. 59–60). Entscheidungen mit mehr als einem Entscheider werden im Nachfolgenden ausgeklammert und von einem einzelnen Akteur ausgegangen, wobei diese Wahl bei der Entwicklung eines Entscheidungsmodells für die Auswahl für Energieeffizienzmaßnahmen in Industriebetrieben in Kapitel 5 genauer motiviert wird.

Weitere Klassifizierungsmöglichkeiten werden von Schmidt-Bäumler 2020, S. 59–60 in Anlehnung an die Literatur vorgestellt (Geldermann 2006; Laux 2014; Westphal 2016):

- Entscheidungsprobleme können durch die **Anzahl der Ziele** unterschieden werden. Bei Verfahren der Mehrzielentscheidung existieren das MODM (Multi Objective Decision Making) und das MADM (Multi Attribute Decision Making). Beim MODM wird aus einer stetigen Menge an Alternativen mittels mathematischer Optimierungsverfahren die Lösung ermittelt. Beim MADM erfolgt hingegen ein Vergleich innerhalb einer diskreten Menge Alternativen. Eine ausführliche Diskussion von Mehrzielentscheidungen findet sich in Kapitel 2.3.5.
- Durch eine Einbeziehung der Zeit kann zwischen **statischen und dynamischen Entscheidungsmodellen** unterschieden werden, wobei bei dynamischen Modellen ein oder mehrere Parameter mit der Zeit veränderlich sind.
- Zudem kann zwischen **einstufigen und mehrstufigen Modellen** unterschieden werden. Bei einstufigen Modellen werden Entscheidungen unabhängig von späteren Folgeentscheidungen getroffen. Bei mehrstufigen liegen Entscheidungen vor, die in Interdependenz miteinander stehen und hintereinander getroffen werden (Rommelfanger et al. 2002, S. 26).

### 2.3.4. Ziele und Präferenzen

#### 2.3.4.1. Anforderungen an Zielsysteme

Um Entscheidungen rational zu treffen, müssen diese an bestimmten Zielen gemessen und bewertet werden. Voraussetzung ist eine Klarheit des Entscheidungsträgers bezüglich der Ziele. Hierbei wird davon ausgegangen, dass der Entscheider sich mit der Zielfunktion identifiziert, deren Werte durch Nutzeinheiten zu bewerten sind (Dinkelbach et al. 1996, S. 29–30; Eisenführ et al. 2003, S. 53; Göbel 2014, S. 56–57).

Laux bezeichnet die Menge an Zielgrößen eines Entscheidungsträgers als individuelles Zielsystem und hebt hervor (Laux 2014, S. 34): *„Die Zuordnung des Präferenzwertes  $\Phi(\alpha_a)$  zu einer Alternative  $\alpha_a$  setzt voraus, dass der Entscheider die (möglichen) Ergebnisse der Alternative bewertet. Hierzu muss er, wenn er sich an mehreren Zielgrößen*

*orientiert, zwischen den unterschiedlichen Ausprägungen der Zielgrößen abwägen und damit die Zielgrößen vergleichbar machen.“*

Eisenführ nennt relevante Anforderungen an das Zielsystem angelehnt an Keeney 1992, S. 82 und fasst diese weiter zusammen, weshalb im Nachfolgenden die Definition von Eisenführ verwendet werden soll (Eisenführ et al. 2003, S. 50):

- **Vollständig:** Alle für den Entscheider relevanten Konsequenzen seiner Entscheidungen müssen berücksichtigt sein.
- **Redundanzfrei:** Ziele und deren Bedeutung sollen sich möglichst nicht überschneiden, da es hierdurch zu einer unerwünschten Übergewichtung von einzelnen Zielen kommen könnte.
- **Messbar:** *„Die Zielerreichung soll messbar sein. Möglichst treffend bedeutet: Es soll das gemessen werden, was dem Entscheider wirklich wichtig ist. Der Entscheider sollte die Bedeutung der verwendeten Zielvariablen genau verstehen.“*
- **Präferenzunabhängig:** Der Entscheider soll die einzelnen Ziele möglichst unabhängig von anderen Zielen bewerten können.

#### 2.3.4.2. Ordnungs- und Transitivitätsaxiom

Voraussetzung, um Alternativen bewerten zu können und letztendlich eine optimale Alternative erkennen zu können, ist die Existenz einer Präferenzordnung eines Entscheiders. An diese werden Anforderungen gestellt, die ein rationaler Entscheidungsträger erfüllen muss (Meyer 2000, S. 26). Diese von Laux auch als Mindestanforderungen bezeichneten Anforderungen sind das Ordnungs- und Transitivitätsaxiom (Laux 2014, S. 34).

Angelehnt an die Definitionen von Laux drückt das Ordnungsaxiom aus, dass der Entscheidungsträger für jedes Ergebnispaar  $x_i$  und  $x_j$  formulieren kann, ob gilt (Laux 2014, S. 42):

$$x_i > x_j \text{ oder } x_i \sim x_j \text{ oder } x_j > x_i$$

Wobei die Symbole besagen, dass gilt:

$x_i \succ x_j \hat{=} \text{der Entscheider präferiert das Ergebnis } x_i \text{ gegenüber } x_j$

$x_i \sim x_j \hat{=} \text{der Entscheider ist indifferent zwischen } x_i \text{ und } x_j$

$x_i \prec x_j \hat{=} \text{der Entscheider präferiert das Ergebnis } x_j \text{ gegenüber } x_i$

Das Transitivitätsaxiom besagt, der Entscheidungsträger ist in seiner Präferenz konsistent, wobei die konkreten Anforderungen sind (Laux 2014, S. 42):

*Gilt  $x_i \sim x_j$  und  $x_j \sim x_k$ , dann gilt auch  $x_i \sim x_k$*

*Gilt  $x_i \succ x_j$  und  $x_j \succ x_k$ , dann gilt auch  $x_i \succ x_k$*

*Gilt  $x_i \succ x_j$  und  $x_j \sim x_k$ , dann gilt auch  $x_i \succ x_k$*

Laux hebt dabei hervor, dass sich das Transitivitätsaxiom auf einen bestimmten Zeitpunkt bezieht, da sich Präferenzen grundsätzlich mit der Zeit wandeln können (Laux 2014, S. 42).

### 2.3.4.3. Präferenzen

Unter Voraussetzung der eingeführten Ordnungsaxiome können Präferenzen des Entscheidungsträgers mithilfe von Funktionen modelliert werden, die im Fall von Entscheidungen unter Sicherheit üblicherweise als Wertfunktionen und bei Entscheidungen unter Risiko als Nutzenfunktionen bezeichnet werden (Eisenführ et al. 2003, S. 33). Die Präferenzen des Entscheiders müssen so umgewandelt werden, dass die Präferenzen des Entscheidungsträgers richtig abgebildet werden (Laux 2014, S. 36).

Mithilfe einer Präferenzfunktion wird einer bestimmten Alternative  $a_a$  ein Präferenzwert  $\Phi(a_a)$  zugeordnet, wobei dies auch eine Berücksichtigung von Unsicherheiten einschließt. Im Falle einer Entscheidung unter Sicherheit ist die Wahl einer Alternative  $a_a$  mit einem eindeutigen Ergebnis  $x_a$  verbunden. In diesem Fall wird die Bewertungsfunktion als Wertfunktion  $U(x_a)$  bezeichnet und es gilt  $U(x_a) = \Phi(a_a)$  (Laux 2014, S. 34–35).

Die Auswahl einer besten Alternative entspricht der Maximierung des Nutzens des Ergebnisses. Die Nutzenfunktion kann in diesem Fall durch eine Funktion  $U(x) = U(Z_1, Z_2, \dots, Z_n)$  dargestellt werden, wobei  $Z_1, Z_2, \dots, Z_n$  die Zielgrößenausprägungen repräsentieren. Die Zielfunktion lautet in diesem Fall (Laux 2014, S. 75):

$$U(x_a) = U(Z_{a1}, Z_{a2}, \dots, Z_{aN_2}) \rightarrow \max_a! \quad (2.11)$$

Bei Entscheidungsträgern lassen sich zudem verschiedene Typen der Risikoneigung unterscheiden, wobei zwischen Risikoneutralität, Risikoaversion und Risikofreude unterschieden wird. Sei  $x$  eine risikobehaftete Einkommensgröße, deren Erwartungswert  $E(x)$  mit der Zufallsvariable  $x$  sowie einem Sicherheitsäquivalent  $S\ddot{A}$ . Die Differenz  $R = E(x) - S\ddot{A}$  ist als Risikoprämie definiert (Kräkel 2007, S. 70).

Es gilt (Kräkel 2007, S. 70):

$$\text{risikoneutral: } E(x) = S\ddot{A} \quad , R = 0$$

$$\text{risikoavers: } E(x) > S\ddot{A} \quad , R > 0$$

$$\text{risikoaffin: } E(x) < S\ddot{A} \quad , R < 0$$

### 2.3.5. Mehrzielentscheidungen

Die Bedeutung der Mehrzielentscheidung wird bei Unternehmen durch weitere Zielsetzungen neben der Gewinnmaximierung motiviert, welche für die Entscheidungsfindung als alleiniges Kriterium in der Regel zu allgemein ist. Weitere Ziele werden deshalb in messbare Größen zerlegt, die als Anhaltspunkte für die Zielerreichung betrachtet werden (Göbel 2014, S. 63).

Rommelbacher sieht gerade in der Projektbewertung ein typisches Problem der Mehrzielentscheidung, da neben wenigen quantitativen weitere qualitative Zielkriterien berücksichtigt werden müssen (Rommelfanger et al. 2002, S. 133). Der Industriebereich wird als ein Sektor genannt, in dem häufig Mehrzielentscheidungen anzutreffen sind, weshalb gerade dort „*einfache und systematische*“ Verfahren der Entscheidungsfindung notwendig sind (Rao 2007, S. 4).

Die multikriterielle Entscheidungsanalyse, oftmals unter dem englischen Begriff **Multi Criteria Analysis** (MCDA) bekannt, wird als interdisziplinäres Forschungsgebiet beschrieben, welches Aspekte der Mathematik, Informatik, Psychologie, Sozialwissenschaft und der Wirtschaftswissenschaft vereinigt. Die Anwendungsbereiche

werden überall dort gesehen, wo Entscheidungen von hoher Bedeutung getroffen werden müssen (Ishizaka 2013, S. 2).

Im Grundmodell wird das Entscheidungsmodell einer Entscheidung unter Sicherheit um weitere Ziele ergänzt. Wenn diese miteinander in Konkurrenz stehen, entsteht ein komplexes multikriterielles Entscheidungsproblem (Göbel 2014, S. 64).

Mehrzielentscheidungen oder auch Multi-Criteria-Entscheidungen sind häufig durch Ziele charakterisiert, die in einem Konflikt zueinander stehen. Weitere Merkmale sind (Zimmermann et al. 1991, S. 21):

- Es liegen mehrere Ziele innerhalb des Entscheidungsproblems vor, die vom Entscheidungsträger als relevant eingestuft werden.
- Es liegen in der Regel Zielkonflikte vor, bei denen eine Verbesserung hinsichtlich eines Ziels mit einer Verschlechterung bei einem anderen Ziel einhergeht.
- Ziele werden oftmals mit unterschiedlichen Maßstäben gemessen, die sich nicht untereinander vergleichen lassen.
- Die Lösung des Entscheidungsproblems erfolgt durch Berechnung (Auswahl) einer Alternative, die der Entscheidungsträger am meisten bevorzugt.

Aufgrund der hohen Komplexität des Teilgebiets wird nachfolgend vereinfachend von Entscheidungen ausgegangen, bei denen lediglich ein Entscheidungsträger und eine Entscheidung unter Sicherheit vorliegen.

Bei der Klassifizierung der Mehrzielentscheidungen wird zwischen Multi-Attribut-Entscheidungen (**Multi Attribute Decision Making**) und Multi-Objective-Entscheidungen (**Multi Objective Decision Making**) unterschieden (Zimmermann et al. 1991, S. 25–26; Hirzel 2015, S. 114).

Zimmermann hebt hervor, dass bei Multi-Objective-Entscheidungen die Menge aller Alternativen nicht explizit vorbestimmt ist, sondern Alternativen als zulässig gelten, die bestimmte Nebenbedingungen erfüllen (Zimmermann et al. 1991, S. 25). Voraussetzung für den Einsatz von MODM-Verfahren ist die Festlegung des Entscheidungsträgers auf ein Zielsystem und Nebenbedingungen (Hirzel 2015, S. 114).



MADM-Verfahren lösen das Problem durch Auswahl einer Alternative, wobei die Menge der zulässigen Alternativen in diesem Fall endlich, „*meist sehr klein*“ und im Voraus bekannt ist. Attribute bezeichnen im Fall der MADM Ziele des Entscheidungsträgers und müssen nicht notwendigerweise in Zahlen beschreibbar sein. (Zimmermann et al. 1991, S. 25)

Es wird einschränkend hervorgehoben, dass einzelne Ansätze in vielen Fällen auf einer Mischung aus den verschiedenen Ansätzen bestehen (Greene et al. 2011, S. 417; Schmidt-Bäumler 2020, S. 63).

### 2.3.5.1. Methoden der MODM

MODM-Probleme werden auch als Vektormaximumprobleme bezeichnet. Die Definition ist gegeben durch  $k$  reellwertige Zielfunktionen  $z_1, z_2, \dots, z_k$ , die über der Menge  $X$  an zulässigen Lösungen  $X \subset \mathbb{R}^n$  zu maximieren sind (Zimmermann et al. 1991, S. 97):

$$\max_{x \in X} z(x) = \begin{pmatrix} z_1(x) \\ \dots \\ z_k(x) \end{pmatrix}, k > 1 \quad (2.12)$$

Zimmermann verweist darauf, dass häufig ein Ressourcenvektor einbezogen wird, der Beschränkungen ausdrückt (Zimmermann et al. 1991, S. 98).

Möglichkeiten für die Lösung solcher Probleme sind zunächst in einer Vereinfachung begründet. Göbel schlägt für die Lösung vor, zunächst **ineffiziente Alternativen** zu identifizieren, die von vornherein ausscheiden, da diese von in allen Zielkriterien besseren Alternativen dominiert werden. Effizient (dominant) ist demnach eine Alternative, „[...] wenn es keine andere Alternative gibt, die bezüglich mindestens eines Ziels besser und bezüglich keines Ziels schlechter ist“. Aufgrund von Zielkonflikten ist dies jedoch nur in wenigen praktischen Entscheidungsproblemen der Fall (Göbel 2014, S. 65).

Weiteres vereinfachendes Verfahren ist die **Zieldominanz**, bei der ein entscheidendes Ziel ausgewählt wird und die anderen Ziele vernachlässigt werden (Göbel 2014, S. 66).

Ebenso möglich ist die Festsetzung von **Kick-Out-Bedingungen** für einige oder auch alle Ziele, um Alternativen zu eliminieren, die einzelne Bedingungen nicht erfüllen. Falls

hierdurch noch immer mehrere Alternativen existieren, kann die nachfolgend vorgestellte lexikografische Ordnung durchgeführt werden (Rommelfanger et al. 2002, S. 139).

Bei der **lexikografischen Ordnung** werden in der Reihenfolge der Bedeutung so lange weitere Ziele zum Vergleich der Alternativen herangezogen, bis eine Alternative eindeutig als die beste identifiziert werden kann (Göbel 2014, S. 66). Vorteil des Verfahrens ist, dass lediglich eine ordinale Präferenzordnung vorausgesetzt wird, was für die praktische Anwendung von Vorteil ist (Rommelfanger et al. 2002, S. 138).

Wenn der Entscheider vor dem Einsatz des Verfahrens Informationen bezüglich seiner Präferenzvorstellung hat, handelt sich um eine **Entscheidung mit A-priori-Informationen**. Die von Rommelfanger (Rommelfanger et al. 2002, S. 146) als bekannteste genannte Methode zur Lösung von Zielkonflikten ist in diesem Fall die **Zielgewichtung**, in der jedem Zielkriterium ein subjektiv festgelegtes Gewicht zugeordnet wird.

Der Gesamtnutzen  $u(a_i)$  ergibt sich in diesem Fall aus der Multiplikation der partiellen Nutzenwerte  $u_{ki} = u_k(a_i)$  der Zielkriterien  $Z_k$  und nichtnegativen Gewichten  $g_k$  ( $k = 1, 2, \dots, K$ ):

$$u(a_i) = g_1 u_1(a_i) + \dots + g_K u_K(a_i) = \sum_{k=1}^K g_k u_k(a_i) \quad (2.13)$$

Die Gewichtungsfaktoren werden in der Regel so normiert, dass sie in Summe 1 ergeben, und stellen die Austauschverhältnisse zwischen den Zielgrößen dar (Laux 2014, S. 76).

Trotz des hohen Anklangs in der Praxis wird von Autoren der Nachteil des Verfahrens hervorgehoben. Demnach ist das Ziel, die mehrfache Zielsetzung in eine übergeordnete Nutzenfunktion zu überführen, was praktisch häufig nicht erreichbar ist (Rommelfanger et al. 2002, S. 146). Laux sieht ebenfalls die Problemstellung, dass das Verfahren „[...] in aller Regel nicht zu einer korrekten Abbildung der tatsächlichen Präferenzen des Entscheiders führt“ (Laux 2014, S. 76).

### 2.3.5.2. Methoden der MADM

Die **Nutzwertanalyse** fußt nach Rommelfanger auf dem Wunsch von Praktikern nach „realisierbaren und anwendbaren“ Entscheidungsunterstützungsmethoden. Das Verfahren ist ähnlich der Zielgewichtung, beinhaltet aber eine Zielhierarchie. Die Gewichtung der Einzelziele berechnet sich als Produkt der Stufengewichtung über die Kanten vom Basisziel bis zum Gesamtziel. Zentrale Elemente der Nutzwertanalyse sind die einzelnen Nutzenwerte sowie die Gewichtungen. (Rommelfanger et al. 2002, S. 149–150)

Die einzelnen Schritte der Nutzwertanalyse sind (Götze 2014, S. 193; Zangemeister 2014):

1. Zielkriterienbestimmung,
2. Zielkriteriengewichtung,
3. Teilnutzenbestimmung,
4. Nutzwernermittlung.

Anforderung an die Zielkriterienbestimmung ist eine Nutzenunabhängigkeit der Zielkriterien. Diese ist gegeben, wenn die Erreichung eines Zielkriteriums unabhängig von der Erfüllung eines anderen Kriteriums ist. Darüber hinaus sollte eine Mehrfacherfassung von Projekteigenschaften vermieden werden (Götze 2014, S. 194–195).

Eingeschränkt wird, dass eine vollkommene Nutzenunabhängigkeit in der Regel nicht erzielbar ist und zumeist eine bedingte Nutzenunabhängigkeit für die Entscheidungsfindung als ausreichend betrachtet werden kann (Götze 2014, S. 194; Zangemeister 2014).

Die Gewichtung der Ziele kann über eine direkte Intervallskalierung erfolgen, bei der den Zielkriterien Werte einer Intervallskala zugeordnet werden, sodass diese die Abstände der Präferenzunterschiede des Entscheidungsträgers widerspiegeln. Im Falle einer indirekten Skalierung wird eine Rangfolge der Zielkriterien gebildet, wobei jedes Kriterium gemäß seiner Position eine Rangziffer erhält. (Götze 2014, S. 194)

Nach Götze gilt zudem (Götze 2014, S. 194): „*Falls im ersten Schritt eine mehrstufige Zielhierarchie aufgebaut worden ist, muss für alle Hierarchieebenen eine Gewichtung*

erfolgen. Die Gewichtung der Zielkriterien impliziert die Annahme, dass die Gewichte die Präferenzen des Entscheidungsträgers richtig wiedergeben.“

Die sogenannte Teilnutzenbestimmung gliedert sich auf in die Ermittlung der Ausprägungen der Alternativen bezüglich der Zielkriterien mithilfe einer geeigneten Skala. Darauf folgend werden diese gemessen an ihrem Zielerreichungswert in einen Teilnutzenwert transformiert, wobei die Teilnutzenskala kardinal skaliert sein sollte. Busse von Colbe verweist darauf, dass die Teilnutzenbestimmung im technischen Bereich häufig einfach festgelegt wird; indem etwa eine Alternative mit der höchsten Zielerreichung bei einem Zielkriterium als Benchmark für die Beurteilung genutzt wird und mit einer Teilnutzenzuordnung von 100 % normiert wird (Busse von Colbe et al. 2018, S. 318).

Die Nutzwertermittlung erfolgt durch Anwendung einer additiven Funktion (Götze 2014, S. 196):

$$N_{Ni} = \sum_{k=1}^K n_{ik} w_k \quad (2.14)$$

Dabei stehen  $n_{ik}$  für die Teilnutzenwerte der Alternative  $i$  bezüglich des Kriteriums  $k$  auf der untersten Hierarchiestufe.  $N_{Ni}$  ist der Nutzwert einer Alternative  $i$ .

Rommelfanger diskutiert die Frage, ob der Entscheidungsträger in der Lage ist, jeder Teilzielausprägung einen eindeutigen Nutzenwert zuzuordnen, und sieht hier eine Verwendung von Fuzzy-Nutzenwerten als realistischer an (Rommelfanger et al. 2002, S. 151).

Abbildung 11 fasst das Vorgehen der Nutzwertanalyse zusammen.

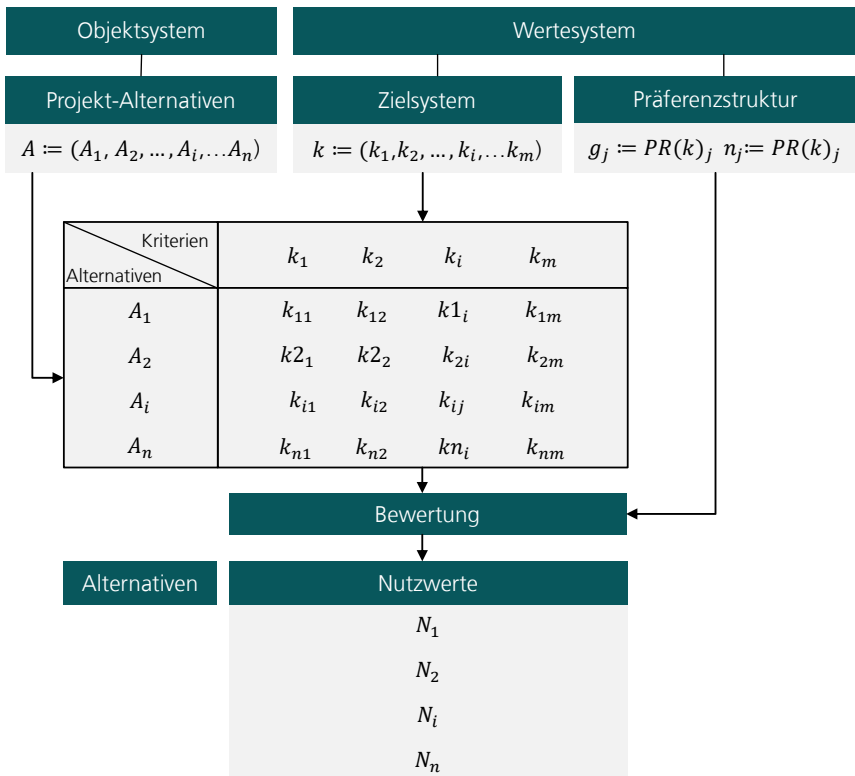


Abbildung 11: Allgemeiner Aufbau von Nutzwertmodellen (Zangemeister 2014, S. 59)

Vorteil der Nutzwertanalyse ist deren gute Nachvollziehbarkeit bei Mehrzielproblemen, wodurch diese in der Unternehmenspraxis ein „recht beliebtes“ Verfahren ist. Problematisch werden jedoch die Datenermittlung der Gewichtungen und Zielerreichungswerte gesehen, die mit relativ hohem Aufwand verbunden sind. (Götze 2014, S. 199–200)

Kritisch diskutiert wird die Einbeziehung monetärer Kriterien. Während Zangemeister in seinem ursprünglichen Konzept keine Einschränkungen vorsieht, sehen einige Autoren die Verwendung von monetären Kriterien als kritisch, da diese häufig in Konflikt mit den

beiden Anforderungen der Nicht-Existenz von Mehrfacherfassungen und der bedingten Nutzenunabhängigkeit stehen (Götze 2014, S. 194).

Ebenso liegen mit der Investitionsrechnung „gesicherte und präzise“ Verfahren vor, deren Information bei einer ordinal skalierten Nutzenanalyse verloren gehen würde (Busse von Colbe et al. 2018, S. 313). Busse von Colbe schlägt in diesem Zuge ein Verfahren vor, bei dem die monetären Aspekte mit der Investitionsrechnung und die nichtmonetären mit einer Nutzwertanalyse erfasst werden. Im Falle von zwei vorhandenen Entscheidungskriterien kann so eine Entscheidungsvorlage generiert werden, die jedoch noch keine Aussage über eine optimale Lösung liefert. Das so entstehende Verfahren ist in Abbildung 12 ersichtlich (Busse von Colbe et al. 2018, S. 311–312).

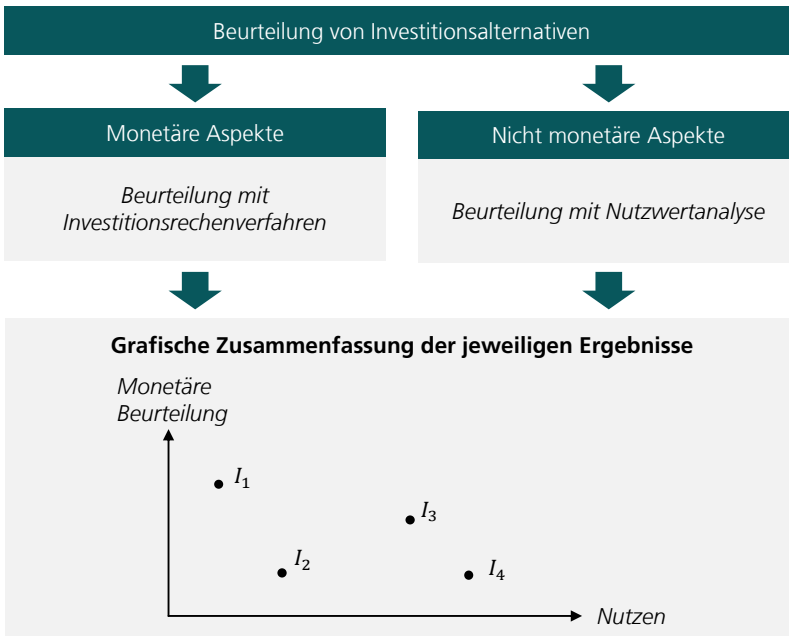


Abbildung 12: Grundsätzliches Vorgehen zur Beurteilung von Investitionsalternativen (Busse von Colbe et al. 2018, S. 312)

Ein weiteres Verfahren stellt der von Saaty entwickelte **Analytische Hierarchie Prozess (AHP)** dar, der sowohl für qualitative als auch quantitative Merkmale geeignet ist (Götze

2014, S. 200–201; Saaty 1987, S. 161). Merkmal des Verfahrens sind Zielhierarchien, die vom Entscheider frei strukturiert werden können. Der AHP wird deshalb auch als „*systematisches Verfahren zur Strukturierung beliebiger Probleme bezeichnet*“ (Ahrlert 2003, S. 34).

Der AHP kann in folgende Schritte eingeteilt werden (Götze 2014, S. 201):

1. Bildung einer Hierarchie,
2. Ermittlung der Prioritäten,
3. Berechnung lokaler Prioritätsvektoren (Gewichtungsfaktoren),
4. Konsistenzüberprüfung der Prioritätenbeurteilung,
5. Bestimmung von Ziel- und Maßnahmenprioritäten für die Hierarchie.

Ähnlich der Nutzwertmethode wird innerhalb des AHP zunächst ein hierarchisches Modell an Kriterien und Unterkriterien entwickelt. Anforderung ist laut Götze, dass alle relevanten Zielgrößen berücksichtigt sind. Ausgehend von diesem Modell erfolgt ein paarweiser Vergleich der Kriterien auf allen Hierarchieebenen mit dem Ziel der Ermittlung der Prioritäten der einzelnen Elemente. (Götze 2014, S. 203; Hirzel 2015, S. 119)

Anforderung ist die Existenz von reziproken Vergleichswerten. Dies bedeutet, dass „[...] die Wichtigkeit des Elements A im Vergleich zu B der Kehrwert der Wichtigkeit von B im Vergleich zu A ist“ (Götze 2014, S. 202; Hirzel 2015, S. 119). Für die Bewertung wird eine in Tabelle 1 dargestellte 9-Punkte-Skala verwendet (Götze 2014, S. 203).

Tabelle 1: Neun-Punkte-Skala von Saaty (Götze 2014, S. 203; Mühlbacher et al. 2013, S. 122)

Skalenwert	Definition	Interpretation
1	Gleiche Bedeutung	Beide verglichenen Elemente haben die gleiche Bedeutung für das nächsthöhere Element.

---

3	Etwas größere Bedeutung	Erfahrung und Einschätzung sprechen für eine etwas größere Bedeutung eines Elements im Vergleich zu einem anderen.
5	Erheblich größere Bedeutung	Erfahrung und Einschätzung sprechen für eine erheblich größere Bedeutung eines Elements im Vergleich zu einem anderen.
7	Sehr viel größere Bedeutung	Die sehr viel größere Bedeutung eines Elements hat sich in der Vergangenheit klar gezeigt.
9	Absolut dominierend	Es handelt sich um den größtmöglichen Bedeutungsunterschied zwischen zwei Elementen.
2, 4, 6, 8	Zwischenwerte	Feinabstufung.

---

Mithilfe der Eigenvektormethode erfolgt die Berechnung eines Prioritätenvektors, der für jede Komponente angibt, welche Bedeutung ein Element in Bezug auf ein betrachtetes Element auf einer höheren Ebene besitzt (Götze 2014, S. 203; Hirzel 2015, S. 119). So werden die Prioritäten über die Berechnung eines Präferenzindex zusammengeführt, der die Vorteilhaftigkeit einer Alternative bemisst (Hirzel 2015, S. 119).

Es sei eine mithilfe von Tabelle 1 erstellte Paarvergleichsmatrix  $V$ , wobei die Bedeutung  $w_k$  der einzelnen Elemente  $k$  bekannt ist. Dann lassen sich die Matrixelemente  $v_{ik}$  folgendermaßen berechnen (Ahlert 2003, S. 43):

$$a_{ij} = \frac{w_i}{w_j} i, j = 1, \dots, n \quad (2.15)$$

$$a_{ij} \left( \frac{w_j}{w_i} \right) = 1 i, j = 1, \dots, n \quad (2.16)$$



$$\sum_{j=1}^n a_{ij} \cdot w_j = n \cdot w_i \quad (2.17)$$

Durch Umformung in Matrixschreibweise ergibt sich:

$$\begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1 \\ \dots \\ w_n \end{bmatrix} = n \cdot \begin{bmatrix} w_1 \\ \dots \\ w_n \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

Dies entspricht einem Eigenwertproblem:

$$A \cdot w = \lambda \cdot w \quad (2.19)$$

Dabei ist  $w$  der Eigenvektor und  $\lambda$  der Eigenwert. Es wird nun der Eigenwert  $\lambda_{max}$  bestimmt, der im Fall einer vollständigen Konsistenz der Paarvergleiche  $n$  ergibt. Falls wie in der Praxis häufig der Fall eine inkonsistente Prioritätenschätzung vorliegt, existieren mehrere Eigenwerte und Eigenvektoren. Beim AHP wird der maximale Eigenwert und der zugehörige Eigenvektor bestimmt, wobei der Eigenvektor so normiert wird, dass dieser 1 ergibt und als Gewichtungsvektor  $w$  aufgefasst wird (Ahlert 2003, S. 44; Götze 2014, S. 205).

Die exakte Ermittlung von Eigenwert und Gewichtungsvektor ist mit einem „*erheblichen Rechenaufwand*“ verbunden, wodurch häufig Näherungsverfahren verwendet werden (Götze 2014, S. 206). Ein häufig verwendetes Verfahren besteht in der sukzessiven Matrixmultiplikation in der Form (Götze 2014, S. 206):

$$V \cdot E; V^2 \cdot E; V^3 \cdot E; \dots; V^o \cdot E \quad (2.20)$$

mit

$V = K \times K$  – *Paarvergleichsmatrix*

$E = K \times 1$  – *Einheitsvektor*

Um Inkonsistenzen zu ermitteln, kann ein Konsistenzindex (KI) berechnet werden (Rommelfanger et al. 2002, S. 155):

$$KI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (2.21)$$

Dieser wird in Verhältnis zu einem Random Index (RI) gesetzt, der sich aus einer Matrix n-ter Ordnung ergibt, die aus einer Tabelle ermittelt werden kann (vgl. Tabelle 2).

Tabelle 2: Random-Index-Werte (Rommelfanger et al. 2002, S. 155)

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI(n)	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45

Die Konsistenz gilt dabei als ausreichend, wenn gilt (Rommelfanger et al. 2002, S. 155):

$$KW = \frac{KI}{RI} \leq 0,1 \quad (2.22)$$

Im letzten Schritt erfolgt die Berechnung der kompletten Hierarchie (Ahlert 2003, S. 48): *„Die globale Kriterienpriorität der Alternativen bezüglich des Oberziels ergibt sich aus der multiplikativen Verknüpfung der lokalen Prioritäten über die gesamte AHP-Hierarchie. Dabei gilt, dass sich auf jeder Hierarchieebene die Summe aller Einzelgewichte stets auf 1 aufsummieren muss.“*

Hervorzuheben ist, dass der AHP auch mit Methoden der Optimierung verknüpft werden kann, in dem etwa die ermittelten Gewichte als Eingangsvariablen für eine Zielgewichtung verwendet werden. Eine Übersicht dieser Anwendung wurde von Ramanathan et al. zusammengefasst (Ramanathan et al. 1995). Weitere Autoren bezeichnen den AHP als eine *„einfache und mächtige“* Methode, um die Präferenzen von Entscheidern zu ermitteln (Korhonen et al., S. 38). Darüber hinaus können Gruppenentscheidungen einbezogen werden, wobei für die Aggregation der individuellen Prioritäten das geometrische Mittel vorgeschlagen wird (Aragon et al. 2012, S. 6).

Saaty selbst präsentiert die Anwendung des AHP bei einem Ressourcen-Allokationsproblem. Bei diesem werden die mit dem AHP ermittelten Prioritäten der Kriterien als Zielfunktion einer linearen Optimierung verwendet (Saaty et al. 2007, S. 1045).

Eine exemplarische AHP-Hierarchie mit lokalen Prioritäten ist in Abbildung 13 ersichtlich.

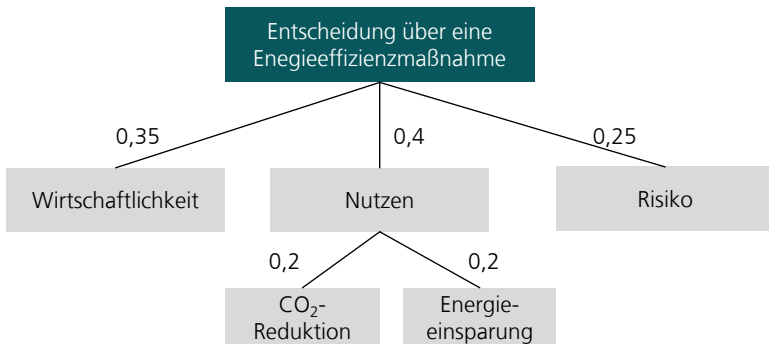


Abbildung 13: Exemplarische AHP-Prioritäten

Götze sieht im Analytischen Hierarchie Prozess einen bedeutenden Anwendungsbereich der Vorbereitung von Entscheidungen mit mehreren Zielgrößen. Zudem können Hierarchien gebildet werden, die verschiedene Zielebenen umfassen. (Götze 2014, S. 200)

Ebenso hebt er hervor, dass der AHP etwa im Rahmen der Nutzwertanalyse für die Ermittlung der Kriteriengewichte genutzt werden kann (Götze 2014, S. 217).

Vorteil ist, dass kleine Verstöße von der Konsistenzbedingung ignoriert werden können, wenn diese einen Konsistenzwert von 0,1 nicht überschreiten (Rommelfanger et al. 2002, S. 153). Ebenso können bei der Ermittlung der Zielgewichte Gruppenentscheidungen berücksichtigt werden (Ahlert 2003, S. 50).

Ein weiteres wichtiges Verfahren stellt **TOPSIS** (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution), ein von Hwang und Yoon entwickeltes Verfahren, dar (Hwang 1981). Seit dessen Veröffentlichung wurde das Verfahren in einer Vielzahl von Anwendungen, etwa Kaufentscheidungen, Entscheidungen in der Produktion und der Nachhaltigkeitsbewertung, eingesetzt (Chakraborty 2022, S. 1).

Idee des Verfahrens ist die Prämisse, dass eine beste Lösung die geringste Distanz zu einer positiv-idealen Lösung und die größte Distanz zu einer negativ-idealen Lösung aufweist.

Basierend auf einem Indexwert, der diese beiden Distanzen einbezieht, können Alternativen sortiert werden. (Chakraborty 2022, S. 2)

Gegeben sei eine Entscheidungsmatrix, in der die Ausprägungen  $d_{ij}$  aller Kriterien  $C_j$  mit  $j = 1, \dots, m$  für alle betrachteten  $n$  Alternativen  $A_i$  mit  $i = 1, \dots, n$  eingetragen sind (Peters et al. 2007, S. 9):

$$\begin{array}{c} C_1 \quad C_j \quad C_m \\ \begin{array}{l} A_1 \\ A_i \\ A_n \end{array} \begin{bmatrix} d_{11} & d_{1j} & d_{1m} \\ d_{i1} & d_{ij} & d_{im} \\ d_{n1} & d_{nj} & d_{nm} \end{bmatrix} \end{array} \quad (2.23)$$

Wobei gilt  $d_{ij} \in \mathbb{R} \forall i = 1, \dots, n \quad \forall j = 1, \dots, m$ . Ein Spaltenvektor der Matrix  $D$  enthält die Ausprägungen der Alternativen  $A$  für ein Kriterium  $C$ , jeder Zeilenvektor alle Merkmalsausprägungen einer bestimmten Alternative. Zunächst erfolgt eine Normalisierung der Entscheidungsmatrix, für die Hwang und Yoon folgende Berechnung vorschlagen (Peters et al. 2007, S. 10):

$$\forall d_{ij} \neq 0: r_{ij} = \frac{d_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n d_{ij}^2}} \quad \forall i = 1, \dots, n \quad \forall j = 1, \dots, m \quad (2.24)$$

$$\forall d_{ij} = 0: r_{ij} = 0 \quad \forall i = 1, \dots, n \quad \forall j = 1, \dots, m$$

Die Quadrierung des Nenners dient einer Vermeidung, dass dieser für Werte  $d_{ij} < 0$  den Wert null annehmen kann. Durch Normalisierung entsteht die normalisierte Entscheidungsmatrix  $R$  (Peters et al. 2007, S. 10):

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{1j} & r_{1m} \\ r_{i1} & r_{ij} & r_{im} \\ r_{n1} & r_{nj} & r_{nm} \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

Eine weitere Multiplikation der normalisierten Entscheidungsmatrix mit einem Kriteriengewichtungsvektor, welcher die Gewichtung der einzelnen Kriterien repräsentiert, ergibt die gewichtete normalisierte Entscheidungsmatrix  $V$  (Chakraborty 2022, S. 2; Peters et al. 2007, S. 12):

$$V = \begin{bmatrix} v_{11} & v_{1j} & v_{1m} \\ v_{i1} & v_{ij} & v_{im} \\ v_{n1} & v_{nj} & v_{nm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_1 r_{11} & w_j r_{1j} & w_m r_{1m} \\ w_1 r_{i1} & w_j r_{ij} & w_m r_{im} \\ w_1 r_{n1} & w_j r_{nj} & w_m r_{nm} \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

Mithilfe der gewichteten normalisierten Entscheidungsmatrix werden zwei virtuelle Alternativen entwickelt, die eine bestmögliche sowie eine schlechtestmögliche Alternative darstellen (Peters et al. 2007, S. 12):

$$\begin{aligned} A^+ &= \left\{ \max_i(v_{ij} | j \in J), \min_i(v_{ij} | j \in J') \mid i = 1, \dots, n \right\} = \{v_1^+, v_j^+, v_m^+\} \\ A^- &= \left\{ \min_i(v_{ij} | j \in J), \max_i(v_{ij} | j \in J') \mid i = 1, \dots, n \right\} = \{v_1^-, v_j^-, v_m^-\} \end{aligned} \quad (2.27)$$

Wobei zwischen zu minimierenden Kostenkriterien und zu maximierenden Nutzenkriterien unterschieden wird:

$$J = \{j = 1, \dots, m \mid \text{Kriterium } j \text{ gehört zu den Nutzenkriterien}\}$$

$$J' = \{j = 1, \dots, m \mid \text{Kriterium } j \text{ gehört zu den Kostenkriterien}\}$$

Im Anschluss wird für jede Alternative ein Abstandsmaß zur bestmöglichen und schlechtestmöglichen Alternative bestimmt (Chakraborty 2022, S. 2; Peters et al. 2007, S. 12):

$$\begin{aligned} S_{i^+} &= \sqrt{\sum_{j=1}^m (v_{ij} - v_j^+)^2} \quad \forall i = 1, \dots, n \\ S_{i^-} &= \sqrt{\sum_{j=1}^m (v_{ij} - v_j^-)^2} \quad \forall i = 1, \dots, n \end{aligned} \quad (2.28)$$

Basierend auf den zuvor ermittelten Abstandsmaßen kann für jede Alternative  $A_i$  ein Abstandsindex  $C_{i^+}$  für die relative Nähe zur bestmöglichen Alternative ermittelt werden, die zudem möglichst weit von der schlechtestmöglichen Alternative entfernt ist (Peters et al. 2007, S. 13):

$$C_{i+} = \frac{S_{i-}}{S_{i+} + S_{i-}} \text{ mit } 0 \leq C_{i+} \leq 1 \quad \forall i = 1, \dots, n \quad (2.29)$$

Aufgrund einer strengen Monotonie des TOPSIS-Index  $C_{i+}$  kann mit dessen Hilfe eine Rangfolge der betrachteten Alternativen ermittelt werden. Als Vorteil des Verfahrens wird die verhältnismäßig einfache Berechnung genannt, weshalb es häufig in der Praxis angewandt wird. Nachteil ist, dass alle Kriterien auf einer Kardinalskala vorliegen müssen. (Peters et al. 2007, S. 15)

Von den bisher betrachteten Verfahren abgegrenzt ist die sogenannte europäische Schule der Prävalenzverfahren. Diese geht nicht von der Existenz mindestens einer optimalen Lösung einer Mehrzielentscheidung aus. Als Vertreter dieser Klasse seien die ELECTRE- und PROMETHEE-Familie genannt (Hirzel 2015, S. 120–121). Ebenso wird davon ausgegangen, dass die Präferenzen des Entscheiders weder frei von Widersprüchen noch zeitlich konstant sind (Hirzel 2015, S. 116). Charakteristisch ist, dass nicht die Menge aller Alternativen, sondern immer zwei Alternativen betrachtet und verglichen werden (Hirzel 2015, S. 121).

### 2.3.5.3. Fuzzy-Logik-basierte Mehrzielentscheidungen

Rommelfanger stellt ein an die Nutzwertanalyse angelehntes Verfahren für die Bewertung von Zielwerten mithilfe von linguistischen Verfahren vor, wodurch auf Experten basierendes Wissen einbezogen werden kann. Im Rahmen des Verfahrens werden deterministische Zielwerte gemäß linguistischer Variablen fuzzifiziert und mithilfe von Expertenregeln durch eine Fuzzy-Interferenz aggregiert. Als Vorteil wird eine hohe Akzeptanz bei Anwendern genannt, die in der guten Nachvollziehbarkeit des Verfahrens begründet liegt (Rommelfanger et al. 2002, S. 173). Nachfolgend wird das Vorgehen des Verfahrens genauer beschrieben.

Die Fuzzy-Mengen-Theorie ermöglicht es, Bewertungsunterschiede mathematisch zu beschreiben, was mithilfe einer **Zugehörigkeitsfunktion** geschieht. Der Wert der Zugehörigkeitsfunktion  $\mu_A(x)$  gibt für jedes  $x \in X$  den Grad an, zu dem dieses gemäß eines Entscheidungsträgers eine Aussage  $A$  erfüllt. Entsprechend werden Aussagen nicht mehr binär mit „Ja“ (1) oder „Nein“ (0) beantwortet (Zimmermann et al. 1991, S. 241).

Die Menge  $A$  aller geordneten Paare wird unscharfe Menge auf  $X$  genannt, bei der  $\mu_A(x)$  den Grad der Zugehörigkeit  $x$  zu  $A$  angibt (Zimmermann et al. 1991, S. 241):

$$A = \{(x, \mu_A(x)) | x \in X\} \quad (2.30)$$

Rommelfanger empfiehlt die Verwendung standardisierter Funktionsformen für die Zugehörigkeitsfunktion, wobei für nicht-technische Entscheidungssysteme s-förmige Referenzfunktionen empfohlen werden, die sich an der Nutzentheorie orientieren (Rommelfanger et al. 2002, S. 172–173).

Mithilfe von linguistischen Variablen werden durch eine Funktion nicht nur Werte oder Zahlen, sondern Worte oder auch Sätze bewertet. Hierdurch können etwa Terme wie „jung“, „alt“ oder „sehr alt“ auf eine unscharfe Menge, etwa mit den Werten  $\{0, 1, 2, 3, \dots, 100\}$  zugeordnet werden (Zimmermann et al. 1991, S. 242). Eine so entstehende exemplarische Zugehörigkeitsfunktion für die Zuordnung der linguistischen Terme „niedrig“, „mittel“ und „hoch“ ist in Abbildung 14 ersichtlich.

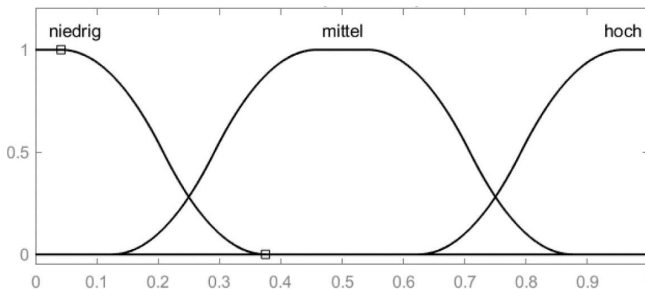


Abbildung 14: Exemplarische Zugehörigkeitsfunktion

Anschließend an die Bestimmung der Zugehörigkeitsfunktionen wird eine Regelbasis entwickelt, die sogenannten **Fuzzy-Inferenz**, mit deren Hilfe die Input- in Outputdaten transformiert werden. Hierfür ordnen zunächst Experten nach ihrer Ansicht allen möglichen Kombinationen an Ausprägungen mit dem Zugehörigkeitsgrad 1 einen Output zu, wie dies exemplarisch in Tabelle 3 dargestellt ist. Vorteil ist, dass Fälle mit einem Zugehörigkeitswert kleiner 1 nicht explizit über Regeln erfasst werden müssen, sondern

unterstellt wird, dass die Regeln auch auf benachbarte Zustände anwendbar sind. Operationen wie Durchschnitt, Vereinigung, Produkt oder Summe sind auf unscharfen Mengen ebenfalls möglich und ergeben als Output wieder eine unscharfe Menge. (Rommelfanger et al. 2002, S. 180–181)

Tabelle 3: Exemplarische Fuzzy-Interferenz

Regel Nr.	Marktanteil	Marktwachstum	Innovationsrate	<b>Absatz</b>
1	niedrig	niedrig	niedrig	<b>schlecht</b>
2	niedrig	mittel	mittel	<b>mittel</b>
3	mittel	hoch	hoch	<b>hoch</b>

Exemplarisch sei die Vereinigung zweier Mengen  $A$  und  $B$  betrachtet, die mit dem Maximums-Operator den jeweils höchsten Zugehörigkeitsgrad berücksichtigt (Zimmermann et al. 1991, S. 243):

$$A \cup B := \{(x, \mu_{A \cup B}(x)) | x \in X\} \text{ mit } \mu_{A \cup B} := \max\{\mu_A(x), \mu_B(x)\} \quad \forall x \in X \quad (2.31)$$

Mithilfe einer **Defuzzifizierungsmethode** kann die erzielte Fuzzy-Bewertung auf eine reelle Zahl verdichtet werden. Als übliche Verfahren werden dabei die Schwerpunktmethode (Center of Gravity) sowie die Flächenhalbierungsmethode (Center of Area) genannt (Rommelfanger et al. 2002, S. 183). Die Formel für Defuzzifizierung mithilfe der Schwerpunktmethode lautet (Runkler 1997, S. 74):

$$x^* = \frac{\int \mu(x) x dx}{\int \mu(x) dx} \quad (2.32)$$

Rommelfanger sieht den Vorteil des Verfahrens in der Möglichkeit, menschliche Denkprozesse zu formalisieren und dadurch sinnvolle Expertensysteme zu konstruieren (Rommelfanger et al. 2002, S. 184).



### 2.3.6. Operations Research

Als Operations Research (OR) wird ein Wissenszweig bezeichnet, „[...] *der sich mit der Analyse von praxisnahen, komplexen Problemstellungen im Rahmen eines Planungsprozesses zum Zweck der Vorbereitung von möglichst guten Entscheidungen durch die Anwendung mathematischer Methoden beschäftigt*“. Als Hauptaufgabe wird die Abbildung von realen Entscheidungsproblemen mithilfe von geeigneten Modellierungen und einer anschließenden Lösung durch geeignete Algorithmen gesehen. (Domschke et al. 2015, S. 1–2)

Gal sieht das OR als einen interdisziplinären Wissenschaftszweig, dessen Experten sich neben dem „*Werkzeugkasten*“ der Mathematik ebenfalls durch Kenntnisse eines Anwendungsgebiets wie der Ingenieurwissenschaft auszeichnen (Gal 1991, S. 14).

Gal diskutiert den Bezug zu soziotechnischen Systemen. OR kann demnach als „*modellgestützte Vorbereitung von Entscheidungen zur Gestaltung und Steuerung soziotechnischer Systeme*“ definiert werden. Er hebt zudem hervor, dass eine ausschließliche Betrachtung von ökonomischen, technischen, soziologischen oder naturwissenschaftlichen Aspekten in soziotechnischen Systemen nicht ausreicht und deshalb immer eine Interdisziplinarität gegeben ist. (Gal 1991, S. 20)

Neumann et al. sehen das Beschäftigungsfeld des OR in quantifizierbaren Problemen, bei denen es mehrere Entscheidungsmöglichkeiten gibt, für die unter den möglichen Alternativen gemäß eines Gütekriteriums die beste Alternative auszuwählen ist. In der Regel ist dies mit der Existenz vieler sogenannter Nebenbedingungen verbunden, die beschreiben, dass etwa benötigte Ressourcen nur begrenzt zur Verfügung stehen. Die Autoren definieren das Feld wie folgt: „Operations Research bedeutet die Suche nach einer bestmöglichen (optimalen) Entscheidung unter Berücksichtigung von Nebenbedingungen.“ (Neumann et al. 2004, S. 5)

Die Teilgebiete des OR umfassen nach der Gliederung von Domschke et al. 2015, S. 8:

Die **Lineare Optimierung**, deren Modelle aus einer oder mehreren linearen Zielfunktionen und einer Anzahl an linearen Nebenbedingungen bestehen. Zudem dürfen die Variablen reelle Werte annehmen (Domschke et al. 2015, S. 8).

Die **ganzzahlige Optimierung**. Bei dieser darf ein Teil der betrachteten Variablen ausschließlich ganze Zahlen oder Binärzahlen annehmen. Zu den betrachteten Modellen gehören dabei auch die in Kapitel 2.2.3 vorgestellten Investitionsprogramme (Domschke et al. 2015, S. 9). Liebermann et al. nennen Investitionsprogramme als eine der relevanten Praxisprobleme der (gemischt-)ganzzahligen Optimierung (Hillier et al. 2015, S. 478).

Im Gegensatz zu Problemen der linearen Optimierung, welche effizient gelöst werden können, ist die Lösungsfindung durch die Ganzzahligkeitsbedingung stark beeinträchtigt. So können nach Hillier et al. auch relativ kleine Probleme abhängig von deren Charakteristik weitaus schwerer zu lösen sein als sehr viel größere Probleme ohne eine Ganzzahligkeitsbedingung. Positiv wirken sich jedoch Weiterentwicklungen bei den vorhandenen Lösungsalgorithmen innerhalb der letzten Jahre auf die Lösungsfindung aus. Dennoch kann mit diesen Algorithmen das Finden einer optimalen Lösung selbst bei kleinen Problemen mit weniger als einigen Hundert binären Variablen nicht garantiert werden (Hillier et al. 2015, S. 497).

Ein möglicher Ansatz zur Lösung von ganzzahligen Optimierungsproblemen ist das sogenannte Branch-and-bound-Verfahren, welches auf dem Divide-and-conquer-Prinzip basiert (Hillier et al. 2015, S. 499–502). Ziel ist es, durch Ermittlung von Schranken Teilprobleme zu identifizieren, die die optimale Lösung nicht enthalten können und dadurch ignoriert werden können (Hillier et al. 2015, S. 502).

Die nachfolgende Beschreibung des Lösungsverfahrens orientiert sich an Domschke et al. 2015, S. 140–141. Das Ausgangsproblem  $P_o$  wird in  $k$  Teilprobleme  $P_1, \dots, P_k$  verzweigt („branching“), wobei dies so geschieht, dass die paarweise Vereinigung der Teilprobleme möglichst leer ist (Domschke et al. 2015, S. 140–142). Die so entstehende Aufteilung in Teilprobleme ist in Abbildung 15 ersichtlich.

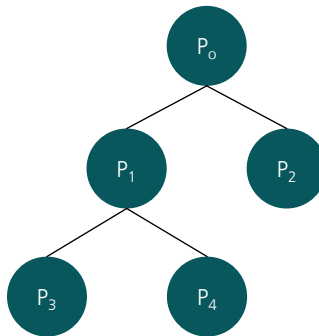


Abbildung 15: Exemplarischer Lösungsbaum

Nachfolgend („bound“) werden geeignete lokale untere Schranken  $\bar{F}$  und eine obere globale Schranke  $\bar{F}$  bestimmt. Die untere Schranke  $\bar{F}$  kann in einem ersten Schritt mit  $-\infty$  festgelegt werden und in weiteren Schritten mithilfe von geeigneten Heuristiken bestimmt werden. Im weiteren Verlauf bestimmt die beste bekannte und zulässige Lösung die untere Schranke. (Domschke et al. 2015, S. 141)

Eine obere Schranke  $\bar{F}$  kann durch eine sogenannte Relaxation  $P'_i$  von  $P_i$  bestimmt werden. Eine Relaxation ist ein vereinfachtes Problem, etwa durch Lockern oder vollständiges Ignorieren von Nebenbedingungen. (Domschke et al. 2015, S. 141)

Es bezeichnet  $X(P_i)$  die Menge der zulässigen Lösungen des Problems  $P_i$ . Ein Problem  $P_i$  gilt als ausgelotet und muss nicht weiter betrachtet oder verzweigt werden, wenn einer der drei Fälle auftritt (Domschke et al. 2015, S. 141):

- a)  $\bar{F}_i \leq \bar{F}$ : Die optimale Lösung des Teilproblems kann nicht besser als die beste bekannte zulässige Lösung sein.
- b)  $\bar{F}_i > \bar{F}$  und die optimale Lösung von  $P'_i$  ist zulässig für  $P_i$  und damit auch für  $P_0$ : Es wurde eine neue beste zulässige Lösung des Problems  $P_0$  gefunden. Man speichert diese und setzt  $\bar{F} := \bar{F}_i$ .
- c)  $X(P'_i) = \emptyset$ :  $P'_i$  besitzt keine zulässige Lösung, damit ist auch  $X(P_i) = \emptyset$ .

Weitere Teilgebiete des OR, auf die nicht weiter eingegangen werden soll, sind: Die **Graphentheorie und Netzplantechnik**, mit deren Hilfe etwa kürzeste Wege sowie maximale oder kostenminimale Flüsse in Graphen bestimmt werden können (Domschke et al. 2015, S. 8). Die **dynamische Optimierung**, in der Modelle betrachtet werden, die in einzelne Stufen zerlegt werden können, die etwa Zeitabschnitte repräsentieren. Ziel ist die Gesamtoptimierung durch eine stufenweise, rekursive Optimierung (Domschke et al. 2015, S. 9). Die **nichtlineare Optimierung** untersucht Modelle mit nichtlinearer Zielfunktion oder auch nichtlinearen Nebenbedingungen (Domschke et al. 2015, S. 9). Die **Warteschlangentheorie** dient „[...] der Untersuchung des Abfertungsverhaltens von Service- und Bedienungsstationen“ und der optimalen Auslegung von diesen. Heutige Anwendungen befassen sich etwa mit der Auslegung von Serverkapazitäten (Domschke et al. 2015, S. 9). **Simulationen** können ebenfalls als ein Teilgebiet des OR betrachtet werden und eignen sich nach Domschke „[...] für die Untersuchung von einzelnen Alternativen bzw. von Systemvarianten im Rahmen komplexer stochastischer (Optimierungs-)Modelle“ (Domschke et al. 2015, S. 9).

#### 2.4. Energieeffizienz in der Fabrik

Die Energieeffizienz-Richtlinie der Europäischen Union definiert **Energieeffizienz** wie folgt (Richtlinie 2012/27/EU 2012, S. 10; Pehnt 2010, S. 2):

$$\text{Energieeffizienz} = \frac{\text{Ertrag an Leistung, Dienstleistungen, Waren oder Energie}}{\text{Energieeinsatz}} \quad (2.33)$$

Das Ziel der Energieeffizienz kann auch beschrieben werden als „[...] einen gewünschten Nutzen (Produkte oder Dienstleistungen) mit möglichst wenig Energieeinsatz herzustellen oder aus einem bestimmten Energieeinsatz möglichst viel Nutzen zu ziehen“ (Müller et al. 2009, S. 2).

Der Begriff der **Energieeffizienzmaßnahmen** wird im Gesetz über Energiedienstleistungen und andere Energieeffizienzmaßnahmen definiert als „[...] alle Maßnahmen, die in der Regel zu überprüfbaren und der Höhe nach mess- oder schätzbaren Energieeffizienzverbesserungen führen“ (EDL-G 2010).

In der Energiewirtschaft können entlang der Stufen von der Gewinnung bis zur Anwendung von Energie folgende Umwandlungsstufen unterschieden werden (Blesl et al. 2017, S. 3; Rebhan 2002, S. 36–39):

- **Primärenergie** ist der Energieinhalt von in der Natur vorkommenden Energieträgern, die technisch noch nicht umgewandelt wurden, und umfasst regenerative, fossile und nukleare Energieträger.
- **Sekundärenergie** ist der Energieinhalt von Energieträgern, die aus Primärenergie durch Umwandlungsschritte gewonnen wurden, bspw. Treibstoff in Raffinerien.
- **Endenergie** ist die Energieart, die beim Verbraucher ankommt, und dient der Nutzenergie.
- **Nutzenergie** umfasst die vom Verbraucher letztendlich benötigten Energieformen, etwa Wärme, mechanische Energie oder Licht.

#### 2.4.1. Treiber und Hemmnisse

Im Folgenden werden Treiber, aber auch Hemmnisse der industriellen Energieeffizienz genauer beleuchtet. Grundsätzlich wird in der Literatur hervorgehoben, dass die bisherige Forschung sich zu großen Teilen auf Hemmnisse fokussiert, während Treiber der Energieeffizienz weniger stark untersucht sind. (Nehler 2016, S. 11)

Bei den Treibern für Energieeffizienz in der Industrie ist zwischen internen und externen Faktoren zu unterscheiden (Müller et al. 2009, S. 21).

Die externen Faktoren lassen sich aus dem Wirkungsgefüge Fabrik, Umwelt und Gesellschaft ableiten. Die Fabrik lässt sich als eine Station im Produktlebenszyklus sehen, der auf die Umwelt einwirkt und diese schädigt, was die Interessen von Menschen beeinträchtigt. Hierdurch stellen diese durch die Politik gesellschaftliche Ansprüche, die sich in Form von Vorschriften und Gesetzen wieder auf die Fabrik niederschlagen, etwa bei deren Planung und Betrieb. (Müller et al. 2009, S. 3)

Eine der wichtigsten Umweltwirkungen lässt sich im Treibhausgaseneffekt sehen, der mit einer Erhöhung der globalen Temperaturen einhergeht, deren Begrenzung ohne die

Energieeffizienz „*keinesfalls zu erreichen*“ ist, was sowohl für Deutschland als auch auf globaler Ebene gilt (Pehnt 2010, S. 10).

Ähnlich wird die Energieeffizienz als eine „*gesellschaftliche Notwendigkeit*“ beschrieben, die für die Industrie jedoch ebenso mit Vorteilen, etwa durch eine Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit durch Kostenreduktionen, einhergeht (Pehnt 2010, S. 7).

Als weiterer wichtiger externer Treiber für die Energieeffizienz werden Energiepreissteigerungen genannt (Müller et al. 2009, S. 6–20). Die Energieeffizienz kann zu einer Senkung der Energiekosten beitragen, durch innovative Produkte aber auch neue Absatzsegmente erschließen (Pehnt 2010, S. 11).

In Summe wird in der Reaktion der Unternehmen auf diese externen Faktoren eine steigende Sensibilisierung für die Energieeffizienz gesehen, die durch gestiegene regulatorische Anforderungen weiter verstärkt wird (Müller et al. 2009, S. 21–22).

Der Stand der empirischen Untersuchung wird von Nehler basierend auf Untersuchungen der schwedischen Industrie zusammengefasst. Als wichtigste Treiber der industriellen Energieeffizienz werden das Engagement der Unternehmensführung, erzielbare Kostenreduktionen sowie die Gefahr von Energiepreissteigerungen genannt (Brunke et al. 2014; Nehler 2016, S. 9; Rohdin et al. 2006; Rohdin et al. 2007; Thollander et al. 2008).

Trotz der hohen Bedeutung der Energieeffizienz ist bereits seit den 1990er-Jahren die Energieeffizienzlücke ein stark untersuchtes Forschungsgebiet (Jaffe et al. 1994).

Diese basiert auf der Beobachtung, dass auch wirtschaftlich attraktive Energieeffizienzmaßnahmen von Unternehmen nicht umgesetzt werden, und befasst sich mit den Gründen, sogenannten Hemmnissen, für dieses Verhalten. Nehler motiviert die Hemmnisforschung mit der Begründung, dass Industrieunternehmen in der Energieeffizienz vor einem komplexen Entscheidungsproblem stehen, an dem mehrere Akteure beteiligt sind. Die Hemmnisforschung biete hier eine umfassende Perspektive aus einem Querschnitt der Wirtschafts-, Verhaltens- und Organisationswissenschaften (Nehler 2016, S. 9).

Neugebauer et al. weisen auf die jeweils individuelle Ausprägung der Hemmnisse hin, welche von Unternehmensgröße, Branchenzugehörigkeit, dem Anteil der Energiekosten und weiteren Faktoren abhängt (Neugebauer 2014, S. 30).

Einzeluntersuchungen von Branchen unterstreichen die Bedeutung von Risiken, die zu den am häufigsten genannten Hindernissen für Energieeffizienzmaßnahmen gehören (Rohdin et al. 2007, S. 673–674). Unternehmen seien demnach eher dadurch motiviert, Risiken durch Investitionen in Energieeffizienzmaßnahmen zu vermeiden, als von den Vorteilen von Energieeffizienzmaßnahmen zu profitieren (Killip et al. 2019, S. 306).

Weitere Autoren ziehen den Schluss, die meisten Hindernisse für Investitionen in der Energieeffizienz seien weder technisch noch wirtschaftlich, sondern verhaltensbedingt und führen einen Mangel an ganzheitlicher Betrachtung als Begründung an (Andrews et al. 2016; Killip et al. 2019, S. 306).

Schmid sieht in einer rein ökonomisch-rationalen Betrachtung des Verhaltens der Akteure in der Energieeffizienz eine unzulässige Vereinfachung und sieht dies eng verknüpft mit dem in Kapitel 2.3.1 diskutierten Konzept der Rationalität (Schmid 2004, S. 49; Simon 1972; Simon 1997):

- Entscheidungen in der Energieeffizienz werden basierend auf unvollständigen Informationen getroffen, da deren Sammlung Beschränkungen, etwa durch einen Zeitbedarf, unterworfen ist.
- Es kann nur eine begrenzte Anzahl an Alternativen geprüft werden.

Empirische Untersuchungen im Rahmen des Energieeffizienz-Index der deutschen Industrie zeigen unterschiedlich ausgeprägte Wahrnehmungen der Relevanz unterschiedlicher Hemmnisse (vgl. Abbildung 16). Ein knappes Drittel (29 %) der befragten Unternehmen stuft ökonomische Hemmnisse bei der Umsetzung von Effizienzmaßnahmen als sehr relevant ein. Nur 19 % der befragten Unternehmen stufen bewusstseinsbezogene Hemmnisse als sehr relevant ein. Hervorzuheben ist, dass alle genannten Hemmnisse von über der Hälfte der Befragten als einigermaßen oder sogar sehr relevant eingestuft werden.

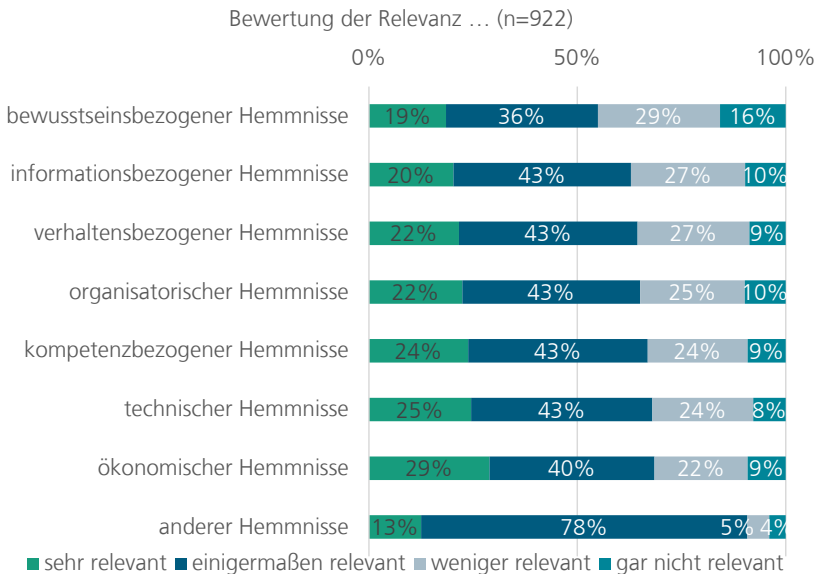


Abbildung 16: Wahrgenommene Hemmnisse in der deutschen Industrie (EEP 2017)

Weitere Untersuchungen mit einem Fokus auf kleine und mittelständische Unternehmen des produzierenden Gewerbes in Deutschland sehen ebenfalls ökonomische Hemmnisse an erster Stelle, wobei vor allem hohe Anschaffungskosten als konkrete Hemmnisse genannt wurden (Fleiter et al. 2012a; Nehler 2016, S. 10).

Auf Basis von Einzeluntersuchungen mittelständischer Unternehmen mithilfe von Interviews schließen Cagno et al. 2014, S. 14–15, dass eine fehlende Priorisierung der Energieeffizienz eines der wichtigsten grundlegenden Hemmnisse ist. Weitergehende Untersuchungen einzelner Querschnittstechnologien verdeutlichen zudem technologiespezifische Hemmnisse (Cagno et al. 2014, S. 17 ff.).

Einschränkend sind auch einzelne kritische Stimmen zu nennen, die das Ausmaß der Energieeffizienzlücke bezweifeln und hierfür die bislang vorherrschenden Forschungsmethoden anführen. Demnach sind bislang keine randomisierten oder quasi-



experimentellen Studien durchgeführt worden, was die Generalisierung der präsentierten Ergebnisse stark einschränke. (Allcott et al. 2012, S. 24–25)

In Summe zeigt sich ein heterogenes Bild, bei dem Hemmnisse nicht nur von Branchen und Unternehmensgröße, sondern auch bezogen auf einzelne Technologien in ihrer Ausprägung variieren und das gesamte Forschungsfeld als noch nicht abgeschlossen betrachtet werden kann.

#### 2.4.2. Maßnahmen

Nach Neugebauer et al. können Maßnahmen der Energieeffizienz drei unterschiedlichen Maßnahmenkategorien zugeordnet werden (Neugebauer et al. 2010, S. 798; Schnellbach 2016, S. 15–16):

- **Produktorientierte Maßnahmen** zielen auf Verbesserungen des Produkts selbst ab, etwa durch die Reduzierung des produktspezifischen Energieverbrauchs.
- **Technische Maßnahmen** beinhalten Optimierungen der Prozessführung und Verbesserungen des Wirkungsgrads eines Systems.
- **Organisatorische Maßnahmen** lassen sich unterteilen in Maßnahmen, die auf eine Optimierung des Energiebezugs abzielen, und umfassen die Implementierung und Nutzung eines Energiemanagementsystems.

Im Rahmen des Projektes Entscheidung für Energieeffizienz wurde eine weitere Taxonomie basierend auf sechs unterschiedlichen Arten von Energieeffizienzmaßnahmen entwickelt. Ausgangspunkt der Kategorien ist die Beobachtung, dass sich Energieeffizienz nicht ausschließlich auf technische Maßnahmen beschränkt. So umfassen vier der Kategorien Maßnahmen, welche etwa auf Verhaltensänderungen bei Mitarbeitern abzielen. Eine Übersicht der unterschiedlichen Maßnahmenkategorien findet sich in Tabelle 4 (Löbke et al. 2019).

Tabelle 4: Kategorien von Energieeffizienzmaßnahmen (Löbbe et al. 2019, S. 29)

Energieeffizienz- praktiken	Funktion (Beispiele)	Anwendungsfall (Beispiele)
Technisch- investiv	Technologieinvestitionen Finanzierung von Maßnahmen	Beschaffung und Implementierung von energieeffizienter Technologie und Ausrüstung
Technisch- organisatorisch	Organisierung, Erweiterung und Optimierung der bestehenden Querschnitt- oder Prozesstechnologie	Optimierung der Prozesstechnologie, Optimierung von Hilfsprozessen
Organisational	Formale und informelle Regeln über Kompetenzen und Verantwortlichkeiten, formale und informelle Regeln für Entscheidungsprozesse	Entwicklung Energiekonzept und -strategie, Energiemanagementsystem, Durchführung von Energieaudits
Informations- bezogen	Sammeln von Informationen über Energieverbrauch, Sammeln von Informationen über Lösungen und Alternativen	Energie-Monitoring, Inanspruchnahme von Energieberatung
Kompetenz- bezogen	Förderung interner Kompetenzen	Workshops, Schulungen
Verhaltensbezogen	Formale und informelle Regeln über erwartetes Verhalten, Mitarbeitersensibilisierung	Explizite Verhaltensregeln, informelle und alltägliche Interaktionen

Bei der Betrachtung von Energieeffizienzmaßnahmen sind die sogenannten nichtenergetischen Vorteile einzubeziehen. Diese beziehen sich auf Vorteile im Zusammenhang mit der Energieeffizienz, die nicht direkt auf den Energieverbrauch oder die Energiekosten zurückzuführen sind. Die Identifizierung und Bewertung der nichtenergetischen Vorteile wird als herausfordernd beschrieben. (IEA 2014, S.189)

Nehler hebt hervor, dass nichtenergetische Vorteile nur selten bei Entscheidungen über Energieeffizienzmaßnahmen einbezogen werden. Befragungen der Industrie weisen jedoch darauf hin, dass eine Monetarisierung der nichtenergetischen Vorteile dazu führen könnte, dass Hemmnisse bei der Umsetzung von Energieeffizienzmaßnahmen reduziert werden. Es wird zudem darauf hingewiesen, dass die Einbeziehung von nichtenergetischen Vorteilen oftmals von fehlenden Informationen über deren Messung, Quantifizierung und Monetarisierung gehemmt wird. (Nehler 2016, S. 88 - 89)

Für die Bewertung der nichtenergetischen Vorteile werden von der IEA verschiedene Bewertungsmethoden vorgestellt und diskutiert, wobei grundsätzlich zwischen quantitativen und qualitativen Bewertungen unterschieden wird. Quantitative Bewertungsmethoden werden als „robust“ und „objektiv“ beschrieben. Es wird jedoch eingeschränkt, dass einige Vorteile nur schwer quantitativ zu bewerten sind, etwa im Falle von höherer Mitarbeiter- oder Kundenzufriedenheit. Um diese dennoch einzubeziehen, werden qualitative Bewertungen, etwa strukturierte Befragungen, vorgeschlagen. (IEA 2014, S.191 - 195)

Nehler diskutiert in ihrer Dissertation ebenfalls ausführlich nichtenergetische Vorteile und stellt eine auf einer Literaturrecherche basierende Sammlung von Vorteilen in der Industrie vor, wobei diese nach den Kategorien Produktion, Betrieb und Wartung, Arbeitsbedingungen, Abfall, Emissionen sowie Weitere gegliedert sind (Nehler 2016, S. 24 - 27). Bei einer Befragung der schwedischen Industrie zeigte sich, dass nur ein geringer Teil der befragten Unternehmen nichtenergetische Vorteile bei der Investitionsentscheidung monetarisiert und einbezieht. Nicht-monetarisierbare Vorteile werden dabei oftmals gar nicht in dem Entscheidungsprozess betrachtet. (Nehler et al. 2016, S. 479)

Rasmussen stellt ein Framework für die Kategorisierung nichtenergetischer Vorteile vor, welches die beiden Betrachtungsdimensionen Quantifizierbarkeit sowie Zeithorizont beinhaltet, und kategorisiert eine ausgewählte Anzahl an Vorteilen mithilfe des Frameworks (vgl. Abbildung 17). Rasmussen zielt mit dem entwickelten Framework darauf ab, nichtenergetische Vorteile innerhalb des Entscheidungsprozesses über Energieeffizienzmaßnahmen einzubeziehen. Hervorzuheben sind die Überschneidungen

bei der Kategorisierung, die von der Autorin bewusst verwendet und motiviert werden. (Rasmussen 2017)

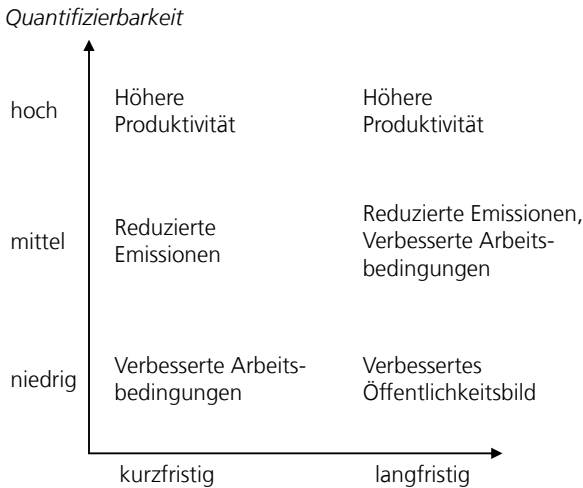


Abbildung 17: Framework für die Kategorisierung nichtenergetischer Vorteile (Rasmussen, S.13)

### 2.4.3. Entscheidungsprozesse

Nehler betrachtet die Untersuchung von Entscheidungsprozessen als in der Energieeffizienz von hoher Bedeutung. Der Entscheidungsprozess ist demnach als eine dynamische Abfolge an Schritten zu betrachten und lässt sich nicht auf einen einzelnen Zeitpunkt reduzieren. (Cooremans 2012; Nehler 2016, S. 8)

Im Rahmen der Untersuchung von Entscheidungsprozessen von Energieeffizienzmaßnahmen folgert Schmidt, dass Energieeffizienz entweder eigentlicher Entscheidungsgegenstand in Form einer Maßnahme oder ein weiteres Bewertungskriterium von beliebigen Investitions- oder Maßnahmenentscheidungen ist. Im ersten Fall repräsentiert die Energieeffizienzsteigerung den primären Grund der Investitionsentscheidung, etwa bei der Entscheidung über die Durchführung einer industriellen Energieeffizienzmaßnahme. Im zweiten Fall ist die Energieeffizienz nicht

primärer Grund für eine Investitionstätigkeit und nur eines von mehreren Bewertungskriterien, beispielsweise bei der Investitionsentscheidung über die Beschaffung einer Maschine oder Anlage. (Schmid 2004, S. 83)

Schmid erläutert den unternehmerischen Entscheidungsprozess in der Energieeffizienz (Schmid 2004, S. 86): Laut diesem stellt die Problemwahrnehmung den ersten Schritt dar, der durch verschiedene auslösende Impulse bedingt wird. In der nachfolgenden Problemformulierung erfolgt eine Konkretisierung des Problems unter Einbeziehung relevanter Nebenbedingungen bezogen auf die Unternehmenssituation. Die Zielsetzung dient der Identifizierung von relevanten Kriterien für die Alternativenbewertung und Lösungswahl. In der anschließenden Alternativensuche werden mögliche Maßnahmen identifiziert, die in einer Alternativenbewertung bewertet werden. Abgeschlossen wird der Entscheidungsprozess durch eine Validierung, die einen Vergleich des Ergebnisses mit der Zielsetzung umfasst. Das so entstehende Modell des Entscheidungsverhaltens nach Schmid ist in Abbildung 18 dargestellt.

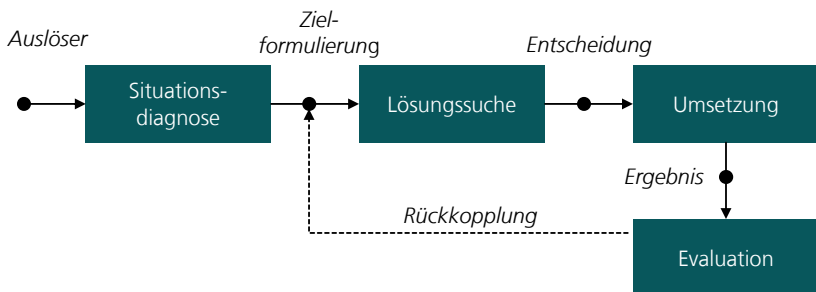


Abbildung 18: Prozessmodell des Entscheidungsverhaltens (Schmid 2004, S. 84)

Bei Betrachtung von strukturierten Entscheidungsprozessen ist zudem auf das **Energiemanagement als kontinuierlicher Verbesserungsprozess** einzugehen. Innerhalb von Energiemanagement und Energiemanagementsystemen (EMS) sind zahlreiche systematische Herangehensweisen und Normen mit einem Bezug zur Energieeffizienz zu nennen, etwa DIN ISO 14001, DIN 15900, DIN ISO 50001 sowie der Eco Management and Audit Scheme (EMAS). (Blesl et al. 2017, S. 36)

Innerhalb DIN ISO 50001 ist ein Energiemanagement als ein rekursives Vorgehen genormt, in dessen Rahmen ein Zyklus aus Planen-Durchführen-Prüfen-Handeln (PDCA) wiederholt durchlaufen wird (Blesl et al. 2017, S. 38; DIN EN ISO 50001:2018-12).

Die einzelnen Bestandteile dieses PDCA-Zyklus sind (Blesl et al. 2017, S. 38; DIN EN ISO 50001:2018-12):

- **Planen:** Festlegung einer Energiepolitik und Zielen, Festlegung von Maßnahmen zur Behandlung von Risiken und Chancen, Durchführung von energetischen Bewertungen und Identifizierung wesentlicher Energieverbräuche.
- **Durchführen:** Umsetzung von Aktionsplänen sowie Kommunikation und Sicherstellung von Kompetenzen.
- **Prüfen:** Überwachung, Messung, Bewertung und Auditierung.
- **Handeln:** Ergreifen von Maßnahmen zum Umgang mit Nichtkonformitäten und zur fortlaufenden Verbesserung der energiebezogenen Leistung.

Blesl et al. heben hervor, dass die Ausgestaltung eine Transparenz bei der Ausgestaltung der zugrunde liegenden Entscheidungsprozesse im Unternehmen erfordert (Blesl et al. 2017, S. 38).

Energieaudits werden in DIN EN 16247-1 als wichtiger Schritt für Organisationen beschrieben, die Energieeffizienz zu verbessern und den Energieverbrauch zu senken. Die einzelnen Elemente des Energieauditprozesses nach DIN EN 16247-1 lauten:

- Ein einleitender Kontakt, bei dem Rahmenbedingungen und Gesamtzusammenhang des Energieauditprozesses vereinbart und ermittelt werden.
- Eine Auftakt-Besprechung, in der Ziele, Anwendungsbereiche, Vorgehen sowie Grenzen und Tiefen des Energieaudits abgestimmt werden.
- Eine Datenerfassung, die etwa Energieverbräuche und eine Liste der Energieverbrauchenden Systeme umfasst.

- Einen Außeneinsatz, bei dem das zu prüfende Objekt begangen wird, um etwa Arbeitsabläufe und deren Einfluss auf den Energieverbrauch zu verstehen sowie erste Vorschläge zur Verbesserung der Energieeffizienz zu generieren.
- Eine Analyse, in der die aktuelle Situation durch Aufschlüsselung von Energieverbräuchen definiert wird sowie Möglichkeiten zur Verbesserung der Energieeffizienz bestimmt werden.
- Der Erstellung eines Berichts, der ein Umsetzungsprogramm mit Möglichkeiten zur Verbesserung der Energieeffizienz enthält, die zusätzlich bereits in eine Rangfolge gestellt wurden.

## 2.5. Risikomanagement

Die Notwendigkeit für ein systematisches Risikomanagement lässt sich aus dem Wesen des menschlichen und demnach auch unternehmerischen Handelns ableiten. In diesem werden Chancen ergriffen, die immer mit Unwägbarkeiten verbunden sind. Risiken können niemals ausgeschlossen, aber bewertet und eingegrenzt werden. (Brauweiler 2019, S. 1–5; Pinnells 2009, S. 2)

DIN ISO 31000 definiert Risiko als die Auswirkung von Unsicherheit auf Ziele und sieht die entstehenden Auswirkungen als eine Abweichung vom Erwarteten an. Zudem gilt (DIN ISO 31000:2018-10, S. 7): *„Diese Abweichung kann positiv, negativ oder beides sein und kann auf Möglichkeiten und Bedrohungen eingehen, diese verursachen oder durch diese verursacht sein. Ziele können verschiedene Aspekte und Kategorien umfassen und auf verschiedenen Ebenen angewendet werden. Risiko wird üblicherweise durch Risikoursache, der potentiellen Ereignisse, deren Auswirkungen sowie ihrer Wahrscheinlichkeit dargestellt.“* Ebenfalls wird von Risiko als einem Maß für die Größe von Gefahr gesprochen (Hauptmanns 1987, S. 1).

Schnorrenberg et al. 1997, S. 4 gehen auf die unterschiedliche Verwendung des Begriffs in der Entscheidungstheorie ein. In den Begrifflichkeiten der Entscheidungstheorie ist für ein Risiko eine objektive Wahrscheinlichkeit vorhanden, ansonsten wird von Ungewissheit

gesprächen. Risiken im Sinne des Risikomanagements, bei dem in der Regel subjektive Wahrscheinlichkeiten betrachtet werden, müssen demnach klar von den in Kapitel 2.3.3 vorgestellten Entscheidungen unter Risiko in der Entscheidungstheorie abgegrenzt werden (Schnorrenberg et al. 1997, S. 4–5).

Es kann von unterschiedlichen Risikokategorien gesprochen werden. Wirtschaftliche Risiken sind „[...] im weitesten Sinne mit der Finanzierung von Projekten“ verbunden (Schnorrenberg et al. 1997, S. 12). Technische Risiken hingegen können während der Entwicklung, der Produktion oder dem Einsatz von Produkten auftreten und sind in ihrem Ausmaß häufig mit der Neuartigkeit der verwendeten Technologien verbunden (Zentis 2013, S. 17). Weitere zu nennende Risikokategorien sind juristischer, politischer, terminlicher oder soziokultureller Art (Schnorrenberg et al. 1997, S. 11).

Kritische Stimmen sehen die Möglichkeiten des Risikomanagements begrenzt und verweisen auf dessen Grenzen. Nicht zuletzt aufgrund einer immer weiter ansteigenden Komplexität sei unsere Welt aber auch Unternehmen von seltenen und unvorhersehbaren Ereignissen mit einer hohen Auswirkung, sogenannten „Schwarzen Schwänen“, geprägt. Das Risikomanagement solle sich demnach stärker auf die Reduktion der Anfälligkeit für mögliche Extremereignisse konzentrieren, ohne einen zu starken Fokus auf quantitative Methoden oder die Vorhersage von möglichen Risiken zu legen, da dies eine falsche Sicherheit vortäusche und die Natur von realen Risiken ignoriere. (Taleb et al. 2009; Romeike 2003)

### 2.5.1. Prozess des Risikomanagements

Risikomanagement kann beschrieben werden als alle „[...] koordinierte[n] Aktivitäten zur Lenkung und Steuerung einer Organisation in Bezug auf Risiken [...]“ (DIN ISO 31000:2018-10, S. 7). Andere Autoren definieren Risikomanagement als eine systematische Analyse mit dem Zweck der Analyse, Bewertung, Behandlung und Steuerung von Risiken im Unternehmen (Brauweiler 2019, S. 1). Charakteristisch ist in allen Definitionen die Auffassung von Risikomanagement als ein zyklischer Prozess bestehend aus Identifizierung, Bewertung, Abschwächung und Kontrolle von Risiken (Ebert 2013, S. 18; Romeike 2018, S. 9).



Zu Beginn des Regelkreises des Risikomanagements ist es notwendig, die Rahmenbedingungen festzulegen. Hierbei werden die Einbindung in die Aufbauorganisation und Schwellenwerte für Risiken festgelegt (Romeike 2018, S. 36).

Im Schritt der Risikoidentifizierung werden mögliche Quellen, betroffene Bereiche, Ereignisse und Entwicklungen berücksichtigt. Am Ende des Schritts steht ein qualitatives Ergebnis (Romeike 2018, S. 36; S. 36). Als mögliche Methoden, die eingesetzt werden können, werden Kreativitätstechniken, Fragenkataloge, Checklisten basierend auf Erfahrungswissen sowie eine Bearbeitung des Suchfeldes mit offenen Fragen genannt (Rohrschneider 2006, S. 31; Zentis 2013, S. 25).

In der Risikoanalyse werden die identifizierten Risiken mit dem Ziel eines besseren Verständnisses genauer untersucht. Ziel ist es, die Tragweite und deren potenzielle Auswirkungen und Abhängigkeiten der Risiken zu erfassen und möglichst genau schriftlich zu fixieren. (Rohrschneider 2006, S. 47; Romeike 2018, S. 37; Zentis 2013, S. 27)

Die Risikobewertung dient der Quantifizierung der zuvor qualitativ erarbeiteten Ergebnisse. Einzelne Risiken werden durch Schadenspotenzial und deren Eintrittswahrscheinlichkeit bewertet. (Brauweiler 2019, S. 8; Romeike 2018, S. 36)

Die ermittelten Informationen dienen als Grundlage für die Risikosteuerung (Romeike 2018, S. 37). Es wird zwischen aktiven und passiven Maßnahmen der Risikosteuerung unterschieden. Passive Maßnahmen beeinflussen Risiken in deren Schadensausmaß und Eintrittswahrscheinlichkeit nicht, sondern zielen auf eine Verlagerung der Wirkung aus. Aktive Maßnahmen hingegen beeinflussen Risiken in einer Art und Weise, sodass das Risiko reduziert wird. (Brauweiler 2019, S. 12)

Abbildung 19 fasst den Risikomanagementprozess nach ISO 31000 zusammen.



Es kann zudem zwischen Top-Down- und Bottom-Up-Methoden unterschieden werden. Top-Down-Methoden fokussieren sich auf die Folgen von Risiken, insbesondere auf das Unternehmen als Ganzes. Ziel der Methoden ist es bspw., Erträge oder das Betriebsergebnis in Bezug auf die Volatilität zu untersuchen (Romeike 2003, S. 184). Bottom-Up-Methoden gehen von den Risikoursachen aus und leiten mögliche Folgen auf das Unternehmen ab, wodurch eine detaillierte Analyse der Interdependenzen der Einzelrisiken notwendig ist (Romeike 2003, S. 186).

Romeike 2003, S. 102 hebt die hohe Vielzahl an Methoden und Analysemethoden hervor, deren Auswahl er primär durch die Verfügbarkeit der Daten der einzelnen Risiken gesteuert sieht.

Eine Übersicht gängiger Methoden differenziert nach den beiden vorgestellten Dimensionen ist in Abbildung 20 ersichtlich.

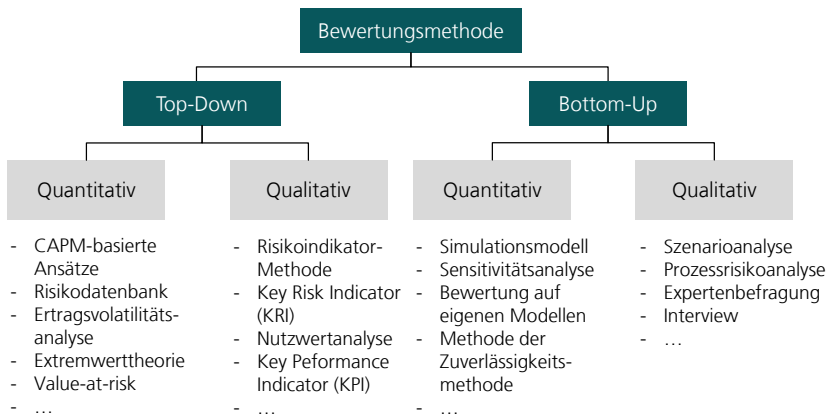


Abbildung 20: Risikobewertungsmethoden (Romeike 2003, S. 185; Zentis 2013, S. 45)

Die Bewertung von Risiken kann typischerweise auf zwei unterschiedliche Arten erfolgen. Bei der Expertenschätzung wird unabhängig von historischen Daten oder tatsächlichen Verteilungen geschätzt. Der Ansatz steht vor allem dann im Vordergrund, wenn keine oder keine ausreichenden empirischen Daten verfügbar sind. Im Gegenzug benötigen

statistische Verfahren eine Datengrundlage basierend auf historischen Daten, um statistische Verteilungen zu kalibrieren. (Romeike 2003, S. 156)

In der Praxis erfolgt die Quantifizierung der Risiken häufig anhand qualitativer Metriken, wobei Eintrittswahrscheinlichkeit und Schadensausmaß mithilfe weniger Stufen und in der Regel anhand von Experteneinschätzungen klassifiziert werden. Diese führt zu einer in Tabelle 5 exemplarisch dargestellten Risikomatrix, die zur grafischen Darstellung von Eintrittswahrscheinlichkeit und Schadensausmaß dient (Romeike 2003, S. 100).

Tabelle 5: Exemplarische Risikomatrix (Wälder 2017, S. 8)

Schadensausmaß	Auftrittenswahrscheinlichkeit		
	Gering	Mittel	Hoch
Existenzbedrohend	4	5	5
Groß	3	4	5
Mittel	2	3	4
Gering	1	2	3
Vernachlässigbar	1	1	2

### 2.5.2.1. Fuzzy-Logik-Ansätze

Die Möglichkeiten einer auf der in Kapitel 2.3.5 vorgestellten Fuzzy-Logik basierenden Risikobewertung wurden in verschiedenen Veröffentlichungen vorgestellt (Pokorádi 2010, Carr et al. 2001, Nieto-Morote et al. 2011). Als Vorteil des Ansatzes wird die mathematische Abbildung einer qualitativen Risikobewertung genannt, durch die Beziehungen und Abhängigkeiten zwischen unterschiedlichen Einzelrisiken abgebildet werden können (Carr et al. 2001, S. 847).

In Abbildung 21 ist eine an Carr et al. (2001) angelehnte Risikoabhängigkeitsstruktur dargestellt, welche mithilfe des Fuzzy-Logik-Ansatzes abgebildet werden kann. Risikofaktoren sind in dieser die kleinste Ebene der Risikohierarchie, die eine mithilfe von

Expertenwissen gewonnene Bewertung von Schadensausmaß und Eintrittswahrscheinlichkeit enthalten. Mithilfe der Fuzzy-Logik werden einzelne Risikofaktoren aufgrund von linguistischen Variablen zu Risiken höherer Stufe aggregiert, die letzten Endes in einem Risikowert münden. Dieser stellt die höchste Ebene der Risikohierarchie dar. (Carr et al. 2001, S. 865)

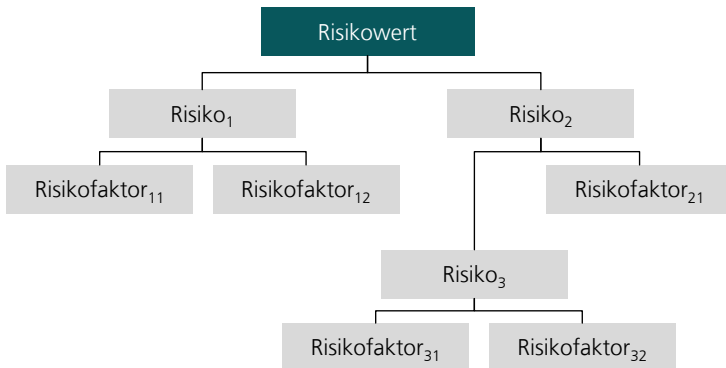


Abbildung 21: Risikoabhängigkeitsstruktur angelehnt an Carr et al. (2001)

Die Anwendung wird dann vorgeschlagen, wenn Eintrittswahrscheinlichkeiten und Schadensausmaß nicht eindeutig von Experten quantifiziert werden können. In diesem Fall kann diese Unschärfe bei den Einschätzungen auch von mehreren Experten mithilfe der Fuzzy-Logik abgebildet werden. (Pikorádi 2010, S. 66)

### 2.5.2.2. Monte-Carlo-Simulationen

Durch die Interpretation von Risiken als Zufallsvariablen mit einer Verteilungsfunktion können Szenarien für Risiken durch eine Simulation dargestellt und geeignete Kennzahlen ermittelt werden (Wälder 2017, S. 91).

Das Ziel von Monte-Carlo-Simulationen besteht darin, Einflussfaktoren als zufällige Größe aufzufassen und mithilfe einer Simulation geeignete Realisierungen zu erzeugen. Durch diese können die Auswirkungen der einzelnen Faktoren auf ein System ermittelt werden. Nützlich ist die Monte-Carlo-Simulation demnach vor allem dann, wenn der Einsatz

analytischer Methoden nicht praktikabel ist, oder reale Experimente, etwa mit Prototypen, nicht möglich oder zu kostspielig sind (Wälder 2017, S. 82–83).

Die Anwendung der Monte-Carlo-Methoden beruht auf der Verwendung von Pseudo-Zufallszahlen, die in der Regel mithilfe von Zufallszahlen-Generatoren gewonnen werden. Für deren Erzeugung stehen heute in den gängigen Software-Tools entsprechende Generatoren zur Verfügung. (Wälder 2017, S. 83)

Durch geeignete mathematische Verfahren können Zufallszahlen zu einer Verteilungsfunktion  $F(x)$  transformiert werden. Im einfachsten Fall ist dies durch die Inversionsmethode möglich, deren Voraussetzung die Invertierbarkeit der Funktion  $F(x)$  ist, d. h. die Existenz der Funktion  $F^{-1}(x)$ . Seien  $z_i, i = 1, \dots, N$  gleichverteilte Zufallszahlen zwischen 0 und 1. Dann sind Zufallszahlen mit der Verteilungsfunktion  $F(x)$  gegeben durch (Wälder 2017, S. 85):

$$x_i = F^{-1}(z_i), i = 1, \dots, N \quad (2.34)$$

Aufbauend ergibt sich das Vorgehen für die Durchführung einer Monte-Carlo-Simulation (Gleißner et al. 2019, S. 26):

1. Erzeuge Zufallszahlen.
2. Wandle Zufallszahlen in benötigte Verteilung um.
3. Führe Simulationslauf durch.
4. Wiederhole Schritte 1, 2 und 3, bis eine ausreichend hohe Anzahl an Simulationsläufen durchgeführt wurde.
5. Endauswertung, etwa durch Bilden von Mittelwerten, Verrechnung von Value-at-Risk etc.

Wichtig bei der Durchführung einer Monte-Carlo-Simulation ist die Festlegung der zugrunde liegenden Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion. Willeke beschreibt auszugsweise unterschiedliche Verteilungen und deren Anwendungsbereiche (Willeke 1998, S. 1153). Diese sind nachfolgend in Tabelle 6 dargestellt.

Tabelle 6: Beispiele für Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen (Willeke 1998, S. 1153)

Name	Anwendungsbereich
Gleichverteilung	Bei minimalem Informationsstand, bei dem eine Eingrenzung des möglichen Wertebereichs, aber keine Differenzierung der Eintrittswahrscheinlichkeit möglich ist.
Dreiecksverteilung	Bei geringem Informationsstand, bei dem eine ungleichmäßige Wahrscheinlichkeitsverteilung vermutet wird und Angaben über die Lage des Wahrscheinlichkeitsmaximums vorliegen.
Normalverteilung	Bei Streuungen, welche durch das Zusammenwirken der Schwankungen vieler kleiner, voneinander unabhängiger Einflussgrößen verursacht werden.
Lognormalverteilung	Bei Streuungen, deren logarithmische Verteilung durch eine Normalverteilung beschrieben werden kann.

Anwendung findet die Monte-Carlo-Simulation etwa in der Risikoanalyse von Investitionsprojekten in der Energiewirtschaft. Wichtige Bestandteile sind die Identifizierung der relevanten unsicheren Parameter und die Definition von geeigneten Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen. (Willeke 1998)

## 2.6. Zusammenfassung und Zwischenfazit

Mit dem Beschreibungsmodell der Fabrik wurden wichtige Beschreibungs- und Verortungsdimensionen des nachfolgend zu entwickelnden Entscheidungsmodells motiviert und eingeführt und hierdurch die unterschiedlichen Dimensionen des Gegenstandsbereichs aufgespannt, die nachfolgend weiter einzugrenzen sind. Die dargelegten Ziele der Fabrik stellen einen wichtigen Rahmen für die Entwicklung eines eigenen Zielsystems für die Bewertung und Auswahl von Energieeffizienzmaßnahmen dar und nehmen die Zielsetzung in Bezug auf die industrielle Energieeffizienz bereits in Teilen vorweg.

In Kapitel 2.2 wurden unterschiedliche Methoden der Investitionsrechnung vorgestellt. Wichtiges Unterscheidungsmerkmal ist die Unterscheidung zwischen Einzelinvestitionen und Investitionsprogrammen, bei denen simultan über verschiedene Investitionen entschieden wird und die sich als eine Erweiterung der dynamischen Investitionsmodelle auffassen lassen. Im Rahmen des eigenen Ansatzes wird das vorgestellte Modell zur Bestimmung des optimalen Investitionsprogramms bei vorgegebenem Kapitalbudget aufgegriffen.

In Bezug auf die Entscheidungstheorie wurde die Struktur von Entscheidungsmodellen sowie deren Bandbreite vorgestellt. Wichtiges Ergebnis ist das Fazit, dass die Nutzwertanalyse nur für nichtmonetäre Entscheidungskriterien geeignet ist. Der von Busse von Colbe et al. (2018) skizzierte Ansatz für eine Vereinigung von gesicherten monetären Bewertungsmethoden und Nutzwertanalysen stellt eine wichtige Ausgangsbasis für die Entwicklung eines eigenen Ansatzes dar. Ebenso wurden Grundlagen für die Einbeziehung von Expertenwissen bei der Mehrzielentscheidung durch sogenannte Fuzzy-Logik-Ansätze vorgestellt.

Die Energieeffizienz in der Fabrik stellt eine weitere Bezugsdimension dar. Neben der Einführung von wichtigen Definitionen wurden insbesondere Entscheidungsprozesse in der Energieeffizienz sowohl aus empirischer als auch theoretisch motivierter Sicht dargestellt. Hierdurch wurde ein wichtiges Fundament für die Entwicklung eines Entscheidungsmodells gelegt, welches in die Entscheidungsprozesse eingebettet wird. Wichtiges Fazit sind die in Kapitel 2.4.3 beschriebenen strukturierten und semistrukturierten Entscheidungsprozesse in der Energieeffizienz, durch die eine Entwicklung von Entscheidungsmodellen für die optimale Auswahl von Energieeffizienzmaßnahmen erst möglich erscheint.

In Kapitel 2.5 wurde der Begriff des Risikos im Sinne des Risikomanagements von einer Entscheidung unter Risiko abgegrenzt und der Prozess des Risikomanagements, insbesondere der Risikobewertung, vorgestellt. Bezugnehmend auf Vorarbeiten in Kapitel 2.3.5 wurden Fuzzy-Logik-Ansätze für die Risikobewertung vorgestellt, welche einen wichtigen Grundstein für eine Risikobewertungsmethode von Energieeffizienzmaßnahmen darstellen.



## 3. Stand der Technik und der Wissenschaft

In diesem Kapitel werden bestehende Arbeiten des Stands der Technik und der Wissenschaft vorgestellt. Zu Beginn steht eine Vorstellung des methodischen Vorgehens. Anschließend werden unterschiedliche Ansätze mit Bezug zu Entscheidungsmodellen für die Auswahl von Energieeffizienzmaßnahmen vorgestellt. Abschließend wird ein Zwischenfazit gezogen und die gesammelten Ergebnisse zusammengefasst.

### 3.1. Methodisches Vorgehen

Zunächst sollen Ansätze zur optimierten Auswahl von Energieeffizienzmaßnahmen vorgestellt werden. Charakteristisches Merkmal für Ansätze dieser Art sind bereits bewertete Energieeffizienzmaßnahmen, unter denen eine Teilmenge basierend auf Zielen ausgewählt wird.

Ergänzt wird die Analyse des Stands der Technik und der Wissenschaft durch Ansätze, die sich auf die Modellierung und Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen fokussieren. Diese können als eine Teilmenge der zuvor vorgestellten Ansätze zur optimalen Auswahl von Energieeffizienzmaßnahmen betrachtet werden, die ebenfalls ein Bewertungsmodell beinhalten.

Abschließend erfolgt eine Sichtung von Ansätzen, die sich mit der Risikobewertung von Energieeffizienzmaßnahmen befassen. Um alle Vorarbeiten zu erfassen, wird der Fokus hierbei am weitesten geöffnet und auch Ansätze einbezogen, die im Bereich des entscheidungstheoretischen Risikobegriffs verortet sind.

In Summe ergibt sich ein in Abbildung 22 dargestelltes Vorgehen. Ansätze zur optimierten Auswahl von Energieeffizienzmaßnahmen enthalten eine Maßnahmenmodellierung und -bewertung, die auch einen Ansatz zur Risikobewertung von Energieeffizienzmaßnahmen umfassen können. Da die einzelnen Teilaspekte jedoch nicht in allen Ansätzen auf Stufe 1

enthalten sind, werden Ansätze der Stufe 2 und 3 gesondert betrachtet, da diese dennoch wertvolle Hinweise für das Gesamtziel des Forschungsvorhabens liefern.

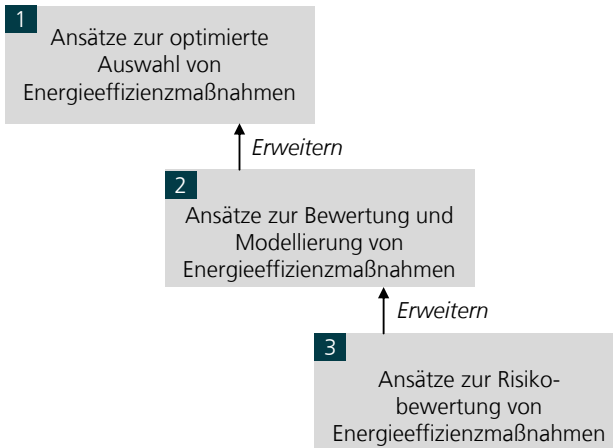


Abbildung 22: Vorgehen zur Sichtung des Stands der Technik und der Wissenschaft

Für die Analyse der relevanten Themenfelder wurden Suchstrings erarbeitet und mit diesen in den Datenbanken arXiv, Scopus und Scholar recherchiert. Für die Filterung der Ansätze wurden zunächst Duplikate eliminiert und die verbliebenen Ergebnisse nach Relevanz sortiert. Darüber hinaus wurden in weiteren Schritten iterativ als relevant erscheinende Quellen in den gesichteten Ergebnissen recherchiert, wobei dies in Teilen in mehreren Schritten erfolgte. Vorgestellt werden nachfolgend Ansätze mit der höchsten Relevanz für die Themenstellung.

Aufgrund einer signifikanten Anzahl an Vorarbeiten außerhalb der Industrie wird der Betrachtungshorizont bei der Analyse des Stands der Technik und der Wissenschaft geöffnet und beinhaltet auch Ansätze, welche für den Einsatz im Bereich der Energieeffizienzsteigerung von Gebäuden entwickelt wurden. Grund hierfür ist, dass die in diesen Anwendungsdomänen entwickelten Methoden grundsätzlich auch auf die Anwendung in der Industrie adaptiert werden können und entsprechend auch gesichtet werden müssen.

## 3.2. Vorstellung betrachteter Ansätze

Aufbauend auf dem zuvor präsentierten methodischen Vorgehen zur Sichtung des Stands der Technik und der Wissenschaft werden im weiteren Verlauf existierende Ansätze beginnend mit der optimierten Auswahl von Energieeffizienzmaßnahmen erläutert.

### 3.2.1. Optimierte Auswahl von Energieeffizienzmaßnahmen

**Ascione et al. (2015)** präsentieren einen Ansatz, um im Zuge einer multikriteriellen Bewertung optimale Energieeffizienzmaßnahmen für Gebäude zu identifizieren. Ziel des Verfahrens ist es, kostenoptimale Maßnahmen zu identifizieren. Hierfür werden bei einem festen Investitionsbudget der Energieverbrauch sowie, als Maß für den thermischen Komfort, die Anzahl der Stunden mit Überhitzung (overheating hours) des Gebäudes minimiert. Im Rahmen einer Fallstudie wird das Verfahren exemplarisch angewandt, wobei als Untersuchungsgegenstand ein größerer Gebäudekomplex mit insgesamt 24 Wohnungen in Neapel betrachtet wird. Mithilfe des Programms EnergyPlus wird das Gebäude zunächst modelliert, um hierdurch die Auswirkungen von verschiedenen Maßnahmen betrachten zu können. Insgesamt werden neun verschiedene Energieeffizienzmaßnahmen betrachtet. (Ascione et al. 2015)

**Bayata et al. (2017)** entwickeln ein Modell für die Energieeffizienzoptimierung im Designprozess von Gebäuden mithilfe einer multikriteriellen Optimierung. Es werden drei Zielfunktionen definiert, die minimiert werden sollen: der Energieverbrauch des Gebäudes, die Investitionshöhe sowie emittierte CO<sub>2</sub>-Emissionen. Optimierungsgegenstand sind bestimmte Eigenschaften des Gebäudes, etwa Wand- und Dachstruktur, für die jeweils unterschiedliche Varianten betrachtet werden. Unter Verwendung des NSGA2-Algorithmus wird die Pareto-Front der effizienten Lösungen aller betrachteten Gebäudeeigenschaften ermittelt. Eine Lösung stellt die Menge aller Eigenschaften eines Gebäudes und deren Ausprägung dar. (Bayata et al. 2017)

**Bonilla-Campos et al. (2020)** stellen ein Entscheidungsunterstützungssystem für die Energieeffizienz-Optimierung von Industrieprozessen in der Buntmetallindustrie vor. Die Methode basiert auf der Simulation von thermischen Prozessen im Aluminiumdruckguss.

Durch Analyse von Simulationsergebnissen werden geeignete Energieeffizienzmaßnahmen abgeleitet, quantifiziert sowie deren Wechselwirkungen bestimmt. Die Maßnahmenbewertung fokussiert sich auf eine Monetarisierung, welche umweltbezogene Faktoren einbezieht und diese ebenfalls monetarisiert. Alleinstellungsmerkmal ist die starke Fokussierung auf einzelne Prozesse und deren Optimierung. Durch diese können auch Wechselwirkungen von Maßnahmen quantifiziert werden. (Bonilla-Campos et al. 2020)

**Bre et al. (2017)** präsentieren ein multikriterielles Optimierungsmodell für die optimale Bestimmung von Gebäudedesignparametern. Betrachtet werden etwa Fenster-, Dach- und Wandtyp, wobei für einzelne Parameter Varianten mit drei bis acht unterschiedlichen Zuständen explizit modelliert werden. Die Lösung basiert auf der Verwendung des NSGA-2-Algorithmus, mit dessen Hilfe die effiziente Parento-Front der Lösungen ermittelt wird. Im Rahmen einer Fallstudie wird die Methode auf ein digitales Modell eines argentinischen Referenzhauses angewandt. (Bre et al. 2017)

**Cano et al. (2014)** stellen einen zweistufigen stochastischen Ansatz für die Auswahl von Energieeffizienzmaßnahmen unter Unsicherheit vor. In der ersten Phase des Entscheidungsprozesses erfolgt die Auswahl von Technologien, in der zweiten Phase wird über die konkrete Nutzung entschieden. Ziel ist die Auswahl der optimalen Technologien zu Beginn jedes Jahres, mit deren Hilfe der Energiebedarf zu minimalen Anschaffungskosten und unter Berücksichtigung von stochastischen Variablen wie Energiepreisen und Betriebskosten zu erfüllen ist. Es erfolgt keine explizite Betrachtung von Energieeffizienzmaßnahmen innerhalb des Modells, sondern eine Betrachtung der Gesamtenergieeffizienz des Gebäudes. (Cano et al. 2014)

**Dehning (2017)** verfolgt in seiner Dissertation das Ziel, ein Konzept zur Steigerung der Energieeffizienz in Fabriken der Automobilproduktion zu entwickeln. Der Ansatz betrachtet zunächst Gewerke der Fahrzeugproduktion, um jeweils ein Best-Practice-Gewerk zu identifizieren und dieses weiter zu verbessern. Dieses repräsentiert einen energetischen Benchmark, ein sogenanntes Niedrigenergiegewerk. Das Verbesserungskonzept ist darauf ausgelegt, nicht nur das Best-Practice-Gewerk zu verbessern, sondern ist allgemein auf beliebige Gewerke anwendbar. Nach der

Identifikation des energieeffizienten Gewerkes werden Effizienzmaßnahmen gesichtet, diese auf Umsetzbarkeit geprüft sowie anhand verschiedener Kriterien priorisiert. Für die Sichtung wird ein wissensbasierter Ansatz verwendet, bei dem Energieeffizienzmaßnahmen über Mitarbeiter vorgeschlagen und durch das Innovationsmanagement ausgewählt werden. Im Anschluss erfolgt die Darstellung der Maßnahmen innerhalb einer Modellierung. Der Entscheidungsprozess der Priorisierung gliedert sich in die Darstellung der Zielvorstellung, was mit der Auswahl der zu optimierenden Zielfunktionen übereinstimmt. Bei den Bewertungskriterien wird zwischen ökologischer und ökonomischer Betrachtung unterschieden. Die ökologische Betrachtung erfolgt über das prozentuale Einsparpotenzial sowie das prozentuale Einsparpotenzial der CO<sub>2</sub>-Emissionen. Bei der ökonomischen Betrachtung werden monetäres Einsparpotenzial pro Jahr, Investitionshöhe und Amortisationszeit betrachtet. Im weiteren Ablauf findet eine Gesamtbewertung jeder Maßnahme statt, in der deren Gesamtnutzwert berechnet und Maßnahmen priorisiert werden. Die sogenannten TOP-Maßnahmen mit dem höchsten Nutzwert werden in einer Matrix dargestellt, wobei die beiden Dimensionen Einsparpotenzial in Prozent und Amortisationszeit in Jahren verwendet werden. Hervorzuheben ist die Einbeziehung von Wechselwirkungen in Form einer Wechselwirkungsmatrix, bei der die Wechselwirkungen in sieben unterschiedlichen Ausprägungen zwischen einer stark abschwächenden bis zu einer stark verstärkenden Wirkung bewertet werden. In einem abschließenden Schritt ermittelt Dehning das aggregierte Maßnahmenpotenzial, welches basierend auf einem zuvor ermittelten Best-Practice-Gewerk die Darstellung eines theoretischen Niedrigenergie-Gewerkes ermöglicht. (Dehning 2017)

**Diakaki et al. (2010)** stellen ein multikriterielles Optimierungsmodell für die Erhöhung der Energieeffizienz von Gebäuden vor. Das Modell besteht aus unterschiedlichen Entscheidungsvariablen, die sich auf die Gebäudehülle und -technik beziehen. Als Zielfunktionen werden Energiebedarf, Anschaffungskosten sowie CO<sub>2</sub>-Emissionen betrachtet. Die Lösung des Optimierungsproblems basiert auf Verfahren der gemischtganzzahligen Optimierung. Anhand eines Fallbeispiels eines Gebäudes wird das

Modell validiert. Die Autoren heben hervor, dass keine ergänzende Simulation wie in anderen Verfahren für Gebäude verwendet wurde. (Diakaki et al. 2010)

**Eskander et al. (2017)** fokussieren sich auf die multikriterielle Optimierung von Energieeffizienzmaßnahmen in portugiesischen Haushalten. Das Optimierungsmodell dient der Identifizierung von optimalen Retrofit-Lösungen in unterschiedlichen Regionen Portugals. Betrachtet werden lediglich sechs unterschiedliche Energieeffizienzmaßnahmen. Die optimalen Energieeffizienzmaßnahmen werden mithilfe eines genetischen Algorithmus unter der Einbeziehung eines beschränkten Investitionsbudgets ausgewählt. Das Investitionsbudget kann lediglich die Ausprägungen niedrig, mittel und hoch annehmen. Hervorzuheben ist, dass der Ansatz Wechselwirkungen zwischen drei der Maßnahmen einbezieht. Diese Einbeziehung erfolgt explizit innerhalb des Fallbeispiels, eine allgemeine Berücksichtigung innerhalb des präsentierten Modells ist nicht vorgesehen. (Eskander et al. 2017)

**Flatau (2019)** entwickelt in seiner Dissertation ein Verfahren zur Bewertung interdependenter Energieeffizienzmaßnahmen. Flatau Arbeit fußt auf der Beobachtung, dass Wechselwirkungen zwischen Energieeffizienzmaßnahmen bislang entweder gänzlich vernachlässigt oder lediglich approximiert abgebildet werden. In diesem Zuge entwickelt der Autor ein Verfahren zur integrierten Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen und setzt dieses für Querschnittstechnologien um. Die Bewertung beruht auf einem Energienachfragemodell sowie einem technologiegetriebenen Bottom-Up-Ansatz, der eine heuristische Optimierung für die Ermittlung von kostenoptimalen Maßnahmenpermutationen verwendet. Flatau bildet Maßnahmenbündel auf Ebene von Prozessgruppen und fasst jeweils sechs Energieeffizienzmaßnahmen zu einem Bündel zusammen. Als Zielgröße wird eine Ertragsmaximierung betrachtet. (Flatau 2019)

**Haag (2013)** präsentiert in seiner Dissertation eine Methodik zur modellbasierten Planung und Bewertung der Energieeffizienz in der Produktion. Der Ansatz basiert auf einer statusbasierten Modellierung von Haupt- und Nebenprozessen mithilfe der Systemtechnik. Jedem Status wird ein Energieprofil zugeordnet, durch welches das energetische Verhalten bei Planungsprozessen berücksichtigt werden kann, etwa in verschiedenen Produktionsszenarien. Innerhalb des Ansatzes werden Wechselwirkungen

zwischen den betrachteten Prozessen modelliert und einbezogen. Der Autor hebt hervor, dass die Modellierung von Wechselwirkungen sehr anwendungsfallspezifisch ist und bislang nicht automatisiert werden konnte. (Haag 2013)

**He et al. (2019)** identifizieren die simultane Betrachtung von mehreren Gebäuden bei der optimalen Auswahl von Energieeffizienzmaßnahmen als eine noch nicht betrachtete Forschungslücke. Ziel ist die Optimierung der Auswahl an NGOs und Behörden, deren Energieeffizienzprojekte gefördert werden. Als Zielfunktion wird die Wirtschaftlichkeit basierend auf dem Kapitalwert maximiert sowie die Amortisationszeit minimiert. Ebenso wird die Energieeinsparung als weiteres Zielkriterium betrachtet. Die so betrachteten Zielkriterien werden durch einen festgelegten Gewichtungsfaktor aggregiert. Um das definierte Optimierungsproblem zu lösen, wird eine Kombination aus Partikelschwarm-Optimierung (PSO) und genetischem Algorithmus (GA) verwendet. (He et al. 2019)

Die Dissertation von **Hirzel (2015)** verfolgt das Ziel, Energieeffizienzmaßnahmen zu analysieren und zu bewerten. Hirzel verwendet ein Verfahren der PROMETHEE-Familie, welches eine Berücksichtigung von Unsicherheiten ermöglicht. Das Entscheidungsunterstützungsverfahren ermöglicht eine techno-ökonomische und multikriterielle Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen. Hirzel validiert die Methode am Beispiel eines Druckluftsystems innerhalb eines mittelständischen Industrieunternehmens. Für dieses wurden Energieeffizienzmaßnahmen durch Entscheidungsträger identifiziert und Annahmen zur technischen und monetären Bewertung getroffen. Aufbauend auf diesen sowie weiteren festgelegten Bewertungskriterien erfolgt die Gesamtbewertung der Maßnahmen. Bei der Bewertung werden weder Wechselwirkungen noch Risiken der Maßnahmen einbezogen. (Hirzel 2015)

**Karmellos et al. (2015)** stellen einen Ansatz zur multikriteriellen Priorisierung von Energieeffizienzmaßnahmen für Gebäude vor. Als Optimierungsproblem wird die Minimierung des jährlichen Primärenergieverbrauchs sowie der Anschaffungskosten unter verschiedenen Nebenbedingungen betrachtet. Das Modell verwendet explizit modellierte Entscheidungsvariablen, die sich auf die Gebäudehülle, das Energiesystem, die Beleuchtung sowie elektrische Anlagen beziehen. Für die Lösung des

Optimierungsproblems wird ein gemischtganzzahliges Verfahren verwendet, wobei ein Gewichtungsfaktor für beide Zielfunktionen verwendet wird. Der Ansatz wird in einem Fallbeispiel anhand dem Modell eines für Großbritannien typischen Gebäudes angewandt, welches aus Literaturquellen abgeleitet wurde. (Karmellos et al. 2015)

**Kontogiorgos et al. (2018)** präsentieren ein Modell für die gemischtganzzahlige Bewertung von Energiesparmaßnahmen in Wohngebäuden unter Unsicherheit. Die Autoren heben die Bedeutung der Unsicherheit auf Verlässlichkeit und Robustheit von Optimierungslösungen hervor und präferieren eine Intervallanalyse für deren Einbeziehung. Innerhalb dieser werden unsichere Parameter durch einen Wertebereich dargestellt, dessen Breite den Grad der Unsicherheit repräsentiert. Die Lösung des aufgestellten Optimierungsproblems erfolgt ebenfalls in Intervallform, in dem dieses in zwei Unterprobleme bestehend aus unterem und oberem Grenzwert der Intervalle aufgeteilt wird. Anwendung findet das Modell in einer Fallstudie, bei der die Auswahl von fünf unterschiedlichen Energieeffizienzmaßnahmen innerhalb eines Wohngebäudes vorgenommen wird. Die Autoren weisen in ihrem Fazit auf einen Forschungsbedarf bezüglich der Einbeziehung von weiteren Energieeffizienzmaßnahmen in die Entscheidungsoptimierung sowie von Wechselwirkungen hin. (Kontogiorgos et al. 2018)

**Le Wang et al. (2020)** stellen ein Modell für die Auswahl von Energieeffizienzmaßnahmen in Hotelgebäuden vor. Merkmal des Ansatzes ist die Betrachtung von Gruppenentscheidungen, bei denen mehr als ein Entscheidungsträger über die Auswahl der Projekte entscheidet. Erstmals kommt ein Fuzzy-Logik-basierter Ansatz zum Einsatz, der für die einzelnen Bewertungskriterien der Energieeffizienzmaßnahmen verwendet wird. Die Präferenzreihenfolge der Maßnahmen wird über einen erweiterten TOPSIS-Ansatz (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) festgelegt, bei dem die Distanz von Alternativen zu der besten und der schlechtesten Alternative bestimmt wird. Das Verfahren wird an einem Fallbeispiel validiert, bei dem eines von vier Hotels für ein Energieeffizienzprojekt ausgewählt wird. (Le Wang et al. 2020)

**Li et al. (2022)** präsentieren einen auf der Zielprogrammierung basierenden Ansatz für die optimale Auslegung von Designparametern von Gebäuden. Alleinstellungsmerkmal



ist neben der bislang wenig beachteten Zielprogrammierung, durch die bestimmte Anspruchsniveaus der Zielfunktionen zu Beginn festgelegt werden können, die Verwendung eines hierarchischen Zielmodells, mit dessen Hilfe unterschiedlicher Prioritäten abgebildet werden sollen. (Li et al. 2022)

**Malatji et al. (2013)** entwickeln ein multikriterielles Optimierungsmodell für die Auswahl von Energieeffizienzmaßnahmen für Gebäude. Das Modell maximiert die Energieeinsparung bei gleichzeitiger Minimierung der Amortisationszeit. Als weitere Nebenbedingung wird ein Kapitalwert größer null gefordert sowie bestimmte Budgetrestriktionen und Energieeinsparziele betrachtet. Alleinstellungsmerkmal ist die Betrachtung eines gesamten Gebäudekomplexes, bei dem bestimmte Maßnahmen mehr als einmal durchgeführt werden können. (Malatji et al. 2013)

**Mikučionienė et al. (2014)** fokussieren sich auf die Auswahl von Energieeffizienzmaßnahmen für den Gebäudesektor. Charakteristisches Merkmal ist die Verwendung eines Entscheidungsbaums bei der Auswahl der Maßnahme. Die Autoren heben hervor, dass in der Literatur bislang wirtschaftliche Bewertungskriterien ausschlaggebend bei der Auswahl von Energieeffizienzmaßnahmen sind, und nennen Amortisationszeit, Kapitalwert und internen Zinsfuß als meistverwendete Kriterien. In einer Erweiterung der Bewertung schlagen die Autoren Kriterien vor, die sich auf den Komfort und die Nachhaltigkeit der Maßnahmen beziehen. Die Autoren entwickeln ein Bewertungssystem bestehend aus fünf übergeordneten Bewertungskriterien, nämlich Energieeffizienz, Umwelteinfluss, Wirtschaftlichkeit, Komfort sowie Nutzungsdauer. Diese gliedern sich teilweise in weitere Unterkriterien auf, etwa die bereits genannten wirtschaftlichen Bewertungskriterien in der Wirtschaftlichkeit. Im Ansatz wird für die Auswahl ein Entscheidungsbaum entwickelt, bei dem im ersten Schritt Maßnahmen ausgewählt werden, die als obligatorisch bei der Gebäudeerneuerung angesehen werden. Im nächsten Schritt werden alle Maßnahmen eliminiert, die Mindestanforderungen an den Komfort nicht erfüllen. Für jede Maßnahme wird anschließend ein allgemeines Nachhaltigkeitskriterium berechnet. Anhand einer Fallstudie wird das Verfahren exemplarisch angewandt und die Ergebnisse grafisch anhand von Netzdiagrammen dargestellt. (Mikučionienė et al. 2014)

**Mokhtar et al. (2020)** stellen einen Ansatz für die Priorisierung von Energieeffizienzmaßnahmen in der Zementindustrie vor. Das mehrphasige Verfahren wählt zunächst alle für das individuelle Zementwerk passenden Energieeffizienzmaßnahmen aus, die grundsätzlich geeignet erscheinen. Dabei werden weitere Kontextfaktoren betrachtet, etwa das Alter des Werks sowie spezifische Faktoren der verwendeten Rohmaterialien und der Energieversorgung. In der zweiten Phase erfolgt die Priorisierung der Maßnahmen anhand einer Kombination aus einem analytischen Hierarchieprozess sowie dem TOPSIS-Verfahren. In der dritten Phase werden die so priorisierten Maßnahmen genauer auf ihre Anwendbarkeit hin untersucht. Ziel ist es, weitere Maßnahmen zu identifizieren, die aufgrund der individuellen Gegebenheiten des betrachteten Zementwerks nicht umsetzbar sind, und diese auszuschließen. Das Verfahren wird von den Autoren anhand dreier Zementwerke im Iran validiert. (Mokhtar et al. 2020)

**Neves et al. (2008)** gehen nicht von einer individuellen Entscheidungsoptimierung eines Unternehmens aus, sondern optimieren die Auswahl von Energieeffizienz-Fördermaßnahmen (energy efficiency initiatives). Für dieses Ziel betrachten die Autoren zunächst die relevanten Ziele und leiten ein umfangreiches Zielsystem aus gesellschaftlichen und umsetzungsbezogenen Zielen ab. Für die Priorisierung der Fördermaßnahmen wird das auf Paarvergleichen basierende ELECTRE-Verfahren verwendet (Élimination et Choix Traduisant la Réalité). Das verwendete Verfahren umfasst eine individuelle Zielgewichtung sowie einen optionalen „Veto“-Mechanismus, bei dem Entscheidungsträger bestimmte Maßnahmen ausschließen können. (Neves et al. 2008)

**Penna et al. (2015)** präsentieren einen Ansatz zur multikriteriellen Optimierung von Energieeffizienzmaßnahmen für den Gebäudesektor. Ausgangspunkt ist die These einer hohen Bedeutung von Retrofit-Lösungen zur Steigerung der Energieeffizienz von Gebäuden. Im Zuge dessen verwenden die Autoren ein Verfahren, welches auf der Verwendung des NSGA-2-Algorithmus in Kombination mit einer dynamischen Simulation basiert, um das definierte Optimierungsproblem zu lösen. Grundlage der Modellierung sind verschiedene Referenzgebäude, die sich in ihrer Architektur leicht unterscheiden. Darauf aufbauend werden insgesamt sechs verschiedene Energieeffizienzmaßnahmen

betrachtet, die für diese Referenzgebäude infrage kommen. Betrachtete Zielfunktionen, die multikriteriell optimiert werden, sind neben dem Kapitalwert ein Komfortwert und die energetische Performance des Gebäudes. Alleinstellungsmerkmal des Verfahrens ist die Verknüpfung einer Simulation für die Auswertung der Fitness der betrachteten Individuen innerhalb eines Teilschrittes des genetischen Algorithmus. (Penna et al. 2015)

**Ribas et al. (2015)** stellen ein Entscheidungsmodell für die Priorisierung von Energieeffizienzprogrammen in brasilianischen Stadtteilen vor. Motivation für das entwickelte Modell ist ein städtisches Programm mit dem Ziel der Entwicklung von prekären Wohngebieten im Vorfeld der Weltmeisterschaft 2014 und der Olympischen Spiele 2016. Im Rahmen einer Initiative soll eine Teilmenge an Stadtteilen bestimmt werden, die für Energieeffizienzprogramme ausgewählt werden. Die Autoren entwickeln hierfür ein multikriterielles Bewertungsverfahren, welches sowohl objektive als auch subjektive Expertenmeinungen umfasst. Das zugrunde liegende Verfahren basiert auf einem paarweisen Vergleich im Rahmen eines fuzzyfizzierten AHP. (Ribas et al. 2015)

**Schieberle (2019)** fokussiert sich in seiner Dissertation auf die Entwicklung eines Ansatzes der stochastischen Optimierung mit dem Ziel, kosteneffiziente Klimaschutzstrategien zu bestimmen. Betrachtet werden politische Maßnahmen. Hervorzuheben ist die Einbeziehung der Risiko-Aversion des Entscheidungsträgers. Schieberle erweitert sein deterministisches Modell in ein stochastisches, um die Unsicherheit verschiedener Faktoren abzubilden. Im Rahmen einer Fallstudie wird der Ansatz auf den Verkehrssektor angewandt und Maßnahmen mit dem Ziel einer Reduktion von  $\text{NO}_x$ -Emissionen betrachtet. (Schieberle 2019)

**Solmaz et al. (2018)** präsentieren einen Ansatz für die optimale Entscheidungsfindung von Energieeffizienzmaßnahmen für Gebäude. Es wird eine Methode bestehend aus einer Kombination aus Varianz-basierter Sensitivitätsanalyse und einer Optimierungsmethode vorgestellt. Im vorgestellten Ansatz erfolgt vor der eigentlichen Optimierung eine Sensitivitätsanalyse. Diese dient der Bestimmung der Maßnahmen mit Vorrang bei der Optimierung, indem den Energieeffizienzmaßnahmen ein Bewertungsparameter für diese zugeordnet wird. Fokus des Ansatzes ist die Auswahl von zuvor bestimmten Gebäudeparametern, etwa von Fenstertypen und der Art der Isolierung. Anwendung

findet der Ansatz bei der optimalen Auswahl von Energieeffizienzmaßnahmen für ein Schulgebäude in der Türkei. (Solmaz et al. 2018)

**Schnellbach (2015)** fokussiert sich in seiner Dissertation auf eine Reduzierung von Energieverschwendung unter Berücksichtigung von Zielgrößen ganzheitlicher Produktionssysteme. Energieeffizienzmaßnahmen werden innerhalb eines Energieeffizienz-Portfolios positioniert und mithilfe von Steckbrief-Vorlagen dokumentiert. Durch eine individuelle Gewichtung erfolgt die Nutzwertberechnung der Einzelmaßnahmen. Mit den Nutzwerten und der multikriteriellen Bewertung wird mithilfe eines Entscheidungsportfolios eine Umsetzungsempfehlung für eine Energieeffizienzmaßnahme abgeleitet. (Schnellbach 2016)

**Sztubecka et al. (2020)** kombinieren eine multikriterielle Bewertung mit einem geografischen Informationssystem (GIS), um Energieeffizienzpotenziale in städtischen Quartieren zu bewerten. Für die Ermittlung der Rangfolge verwenden die Autoren das Verfahren der Zielgewichtung. Im Rahmen einer Fallstudie wird das Verfahren auf die Stadt Zielona Góra angewandt. Durch das GIS wird die Stadt in vier unterschiedliche Bereiche von Gebäudetypen unterteilt und diese bewertet. Dabei werden verschiedene Varianten von Entscheidungsträgern und deren Zielgewichtung betrachtet, etwa Gebäudebesitzer oder lokale Verwaltung. (Sztubecka et al. 2020)

**Tan et al. (2016)** entwickeln ein Modell zur mathematisch optimierten Auswahl von Energieeffizienzmaßnahmen für den Gebäudesektor. Zielgrößen sind CO<sub>2</sub>-Emissionen, Energieeinsparungen sowie Kosteneinsparungen. Eine multikriterielle Betrachtung der Zielfunktionen ist im Modell nicht vorgesehen, es kann jeweils eine der beschriebenen Zielfunktionen verwendet werden. Nebenbedingung ist die Einhaltung des vorhandenen Investitionsbudgets, wobei auf die grundsätzliche Möglichkeit weiterer Restriktionen hingewiesen wird. Im Modellverständnis liegt ein binäres Entscheidungsmodell zwischen investieren und nicht investieren der betrachteten Technologien vor. Tan et al. validieren das Modell anhand eines Projektbeispiels, bei dem 42 Energieeffizienzmaßnahmen für einen Universitätsstandort, welche bereits in bewerteter Form vorliegen, betrachtet werden. (Tan et al. 2016)

**Taylan et al. (2016)** präsentieren ein multikriterielles Entscheidungsmodell für die Auswahl von energieeffizienten Druckluftkompressoren in der petrochemischen Industrie. Die Autoren verwenden sechs unterschiedliche Hauptkriterien, die sich in weitere Unterkriterien unterteilen. Hauptkriterien umfassen Druck, Kapazität, Investitionshöhe, Energieverbrauch, Instandhaltungskosten sowie Zuverlässigkeit der Kompressoren. Das Entscheidungsmodell kombiniert quantitative und qualitative Bewertungskriterien. Die Gewichtung der Bewertungskriterien wird mithilfe eines Fuzzy-Logik-basierten AHP ermittelt. Im Anschluss erfolgt die Auswahl eines geeigneten Kompressors durch das auf Paarvergleichen basierende TOPSIS-Verfahren. (Taylan et al. 2016)

**Thiede (2011)** entwickelt in seiner Arbeit eine energieflussorientierte Fertigungssimulation, die in ein schrittweises Vorgehen eingebettet wird, um die Auswirkungen von Energieeffizienzmaßnahmen zu ermitteln. Das Konzept wird auf verschiedene Fallstudien angewandt, bei denen unterschiedliche Energieträger betrachtet werden. (Thiede 2012)

**Üçtuğ et al. (2012)** präsentieren einen auf der linearen Programmierung basierenden Ansatz zur effizienten Allokation von Energiesparmaßnahmen eines Haushalts. Merkmal des Ansatzes ist, dass weitere Faktoren des Gebäudes einbezogen werden, etwa verfügbare Dachfläche, Anzahl der Zimmer sowie Fensterfläche. Es wird ein lineares Optimierungsproblem definiert, welches der Auslegung der betrachteten Maßnahmen dient, wobei diese nicht stetig, sondern in vordefinierten Ausprägungen vorliegen. Aufgrund der Komplexität der Modellierung werden lediglich vier verschiedene Maßnahmentypen betrachtet. Zielfunktion der Optimierung ist die jährliche Energieeinsparung unter einem zuvor festgelegten Maximalbudget. Innerhalb eines Validierungsbeispiels werden die Amortisationszeiten für die betrachteten Budgets sowie deren jährliche finanzielle Einsparungen dargestellt. (Üçtuğ et al. 2012)

**Wang et al. (2017)** stellen einen Ansatz für die Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen für Gebäude unter Unsicherheiten vor. Die Autoren schlagen eine Entscheidungsverfahren basierend auf der Nutzwerttheorie vor, bei welchem die Entscheider ihre Nutzenfunktion maximieren. Im weiteren Verlauf betrachten die Autoren ein Contracting-Modell aus Sicht der Spieltheorie. Darüber hinaus wird die Verteilung des

Kapitalwertes in Abhängigkeit des Vertrauens an die Vertragspartner ermittelt. (Wang et al. 2017)

Die Dissertation von **Weeber (2022)** verfolgt das Ziel, einen simulationsbasierten Ansatz für die Ermittlung von Kennzahlen mit Energiebezug bei der Fabriksanierung zu entwickeln. Übergeordnetes Ziel ist die Verbesserung der Transparenz und die Vereinfachung bei der Entscheidungsfindung, wobei bei den betrachteten Maßnahmen auch Energieeffizienzmaßnahmen einbezogen werden. Betrachtete Maßnahmenkategorien sind neben der Energieeffizienz und –flexibilität zudem erneuerbare Energien. Bei Energieeffizienzmaßnahmen unterscheidet der Autor zwischen neun verschiedenen Kategorien an Maßnahmen. Mithilfe des Ansatzes können mögliche Maßnahmenkombinationen und deren Abhängigkeiten bewertet werden. (Weeber 2022)

Ziel der Dissertation von **Weskamp (2018)** ist es, Investitionsentscheidungen zur Steigerung der Ökoeffektivität innerbetrieblicher Wertschöpfungsketten zu analysieren. Hierzu entwickelt der Autor ein Bewertungsmodell, welches Handlungsoptionen und mit diesen verbundene Risiken in die Investitionsentscheidung einbezieht. Der Autor fasst betrachtete Investitionen als Realoptionen im Sinne der Realoptionstheorie auf. Basierend auf einer Grundinvestition stehen demnach weitere Folgeinvestitionen zur Verfügung, welche mit Flexibilität bezüglich der (zeitlichen) Umsetzung sowie Unsicherheiten verbunden sind. Im Rahmen der Literaturanalyse wird hervorgehoben, dass insbesondere Unsicherheiten einen investitionshemmenden Einfluss auf Investitionen in Energieeffizienzmaßnahmen ausüben. Die Umsetzung basiert auf einer Kombination von Ansätzen der Realoptionstheorie mit System Dynamics. (Weskamp 2018)

**Yu et al. (2015)** befassen sich mit der multikriteriellen Optimierung der Energieeffizienz von Gebäuden mithilfe von genetischen Algorithmen. Merkmal des Ansatzes ist ein Fokus auf die Design-Phase von Gebäuden. Ziel ist es, den Energieverbrauch zu minimieren sowie den thermischen Komfort zu maximieren. Aufgrund des Betrachtungsfokus werden keine Energieeffizienzmaßnahmen an sich betrachtet, sondern verschiedene Entscheidungen, die bei dem Design der Gebäudehülle sowie der Gebäudeform getroffen werden müssen. Es wird eine Implementierung von NSGA-2 verwendet, wobei diese mit einem neuronalen Netz verbunden werden. Ziel hierbei ist es, die Zeitintensivität mit dem

Ziel einer möglichst hohen Praxisrelevanz möglichst signifikant zu reduzieren. Der Ansatz wird anhand eines Fallbeispiels validiert und dessen Ergebnisse präsentiert. (Yu et al. 2015)

### 3.2.2. Modellierung und Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen

Für die rein ökonomische Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen stehen die in Kapitel 2.2.3 vorgestellten Methoden der Investitionsrechnung zur Verfügung. Für eine ganzheitliche Bewertung sind jedoch weitere Bewertungskriterien einzubeziehen, die zu einer Maßnahmenmodellierung führen. Ansätze mit diesem Fokus werden nachfolgend vorgestellt.

**Conrad (2020)** fokussiert sich in seiner Dissertation auf die Modellierung und Bewertung von Maßnahmen zur kosteneffizienten CO<sub>2</sub>-Verminderung in privaten Haushalten. Der Ansatz zielt darauf ab, Maßnahmen zu identifizieren und auszuwählen, wobei hierfür ein Sektormodell privater Haushalte entwickelt wird. Bei der Bewertung der Maßnahmen werden Wechselwirkungen einbezogen. Es werden keine generischen, sondern ausschließlich ausgewählte spezifische Maßnahmen betrachtet und deren Wechselwirkungen, etwa der Einfluss der Gebäudeautomation auf den Nutzenergiebedarf, analysiert. (Conrad 2020)

**Cooremans (2012)** befasst sich primär mit der Frage, ob die Charakteristik von Energieeffizienzmaßnahmen bei der Investitionsentscheidung von Relevanz ist und wie diese bestimmt ist. Sie zieht den Schluss, dass finanzielle Entscheidungskriterien nur ein Aspekt der Investitionsentscheidung sind. Entscheidungs- und Bewertungskriterien seien demnach vor allem von „strategischen“ Gesichtspunkten getrieben. Cooremans definiert eine Investition in diesem Kontext als strategisch, „[...] wenn diese einen Wettbewerbsvorteil schafft, erhält oder ausbaut“. Aufbauend auf dieser Definition werden als drei strategische Wettbewerbsvorteile der Energieeffizienz Kosten, Risiken und Wert der Maßnahme genannt (vgl. Abbildung 23). Unter dem Wert einer Maßnahme wird etwa eine gesteigerte Produktqualität, ein besseres Image oder eine höhere Zuverlässigkeit verstanden. Bei Risiken werden ausschließlich Risikoreduktionen betrachtet, etwa durch geringere Emissionen oder durch geringeren Verschleiß. Kosten

sind ebenfalls als Kostenreduktionen definiert, etwa durch geringeren Materialbedarf oder Abfallreduktionen.

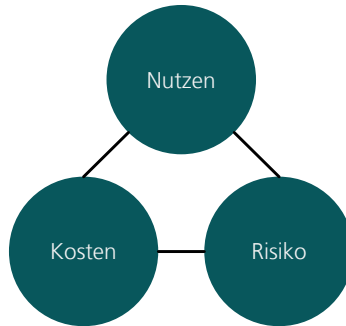


Abbildung 23: Drei Dimensionen der Wettbewerbsvorteile der Energieeffizienz (Cooremans 2012, S. 510)

Im Rahmen einer Befragung von Energiemanagern und Mitarbeitenden aus Finanzabteilungen erfasst Cooremans die Gewichtung der einzelnen strategischen Dimensionen. Es zeigen sich hohe Unterschiede zwischen den einzelnen Unternehmen. Cooremans spricht hier von „*extrem hohen*“ Unterschieden in den Antworten der Befragten je nach Unternehmen. Generell ist die Kostendimension jedoch für alle Entscheidungsträger in den Unternehmen von höchster Bedeutung, wobei diese Aussage für alle Branchen gültig ist. Ebenso wird beobachtet, dass für die Befragten die Risikodimension oftmals synonym mit dem Risiko von Energiepreissteigerungen ist, die als wichtig wahrgenommen werden. (Cooremans 2012)

**Fleiter et al. (2012a)** unterstellen, dass die Charakterisierung von Energieeffizienzmaßnahmen eine bislang noch wenig beachtete Dimension ist. In diesem Zusammenhang entwickeln sie ein Klassifizierungsschema für Energieeffizienzmaßnahmen. Ebenso wird die Frage beantwortet, welche Anforderungen an relevante Bewertungskriterien gestellt werden. Die Autoren kritisieren eine oftmals homogene Betrachtung von Energieeffizienzmaßnahmen, bei der deren individuelle Charakterisierung weitestgehend ignoriert wird. Gerade industrielle Energieeffizienz sei geprägt von heterogenen Maßnahmen, die oftmals individuell entwickelt und eng mit



Produktionssystemen verbunden sind. Basierend auf der Annahme, dass eine Charakterisierung als Ausgangsbasis die Auswahl von Maßnahmen signifikant beeinflussen sollte, werden zunächst Anforderungen an Bewertungskriterien gestellt (Fleiter et al. 2012a, S. 503):

- **Relevanz:** Die gewählten Kriterien sollten die Einführung von Energieeffizienzmaßnahmen beeinflussen.
- **Anwendbar:** Die Kriterien sollten allgemein genug sein, um für viele unterschiedliche Energieeffizienzmaßnahmen geeignet zu sein.
- **Spezifisch:** Die Kriterien sollten so spezifisch bleiben, dass sie möglichst konkret und objektiv ausgewertet werden können.
- **Unabhängig:** Die Kriterien sollten unabhängig von Firma oder anderen kontextuellen Faktoren sein, um die Vergleichbarkeit zwischen Energieeffizienzmaßnahmen zu gewährleisten.
- **Unterscheidbar:** Die Kriterien sollten sich nicht überschneiden und voneinander unterscheiden.

Konkret unterscheidet die von den Autoren entwickelte Bewertung zwischen den Dimensionen technischer Kontext, relativer Vorteil der Maßnahme sowie Informationskontext. Die relativen Vorteile lassen sich als ökonomische Dimension auffassen, da in dieser die Kriterien interner Zinsfuß, Amortisationszeit, Investitionshöhe sowie ergänzend nicht-energetische Vorteile enthalten sind. Die technische Dimension enthält die Nutzungsdauer der Maßnahme, Distanz zum Kernprozess, Typ der Maßnahme sowie eine Unterscheidung zwischen System- und Komponentenebene. Hervorzuheben ist, dass die Attribute auf einer Ordinalskala vorliegen. So wird bspw. beim internen Zinsfuß lediglich zwischen niedrig (< 10 %), mittel (10 –30 %) und hoch (> 30 %) unterschieden. (Fleiter et al. 2012a)

**Nair et al. (2010)** untersuchen Faktoren, die einen Einfluss auf die Umsetzung von Energieeffizienzmaßnahmen im Gebäudesektor besitzen. Im Gegensatz zu weiteren Bewertungssystemen fokussieren sich die Autoren auf persönliche Faktoren, die das

Verhalten des Entscheidungsträgers beeinflussen. Etwa Bildung, Alter, Einkommen und Geschlecht. Darüber hinaus betrachten die Autoren weitere Kontextfaktoren, etwa das Gebäudealter und die wahrgenommenen Energiekosten. Im Rahmen einer Studie befragten die Autoren über 3000 schwedische Haushalte. Bei den persönlichen Faktoren waren Alter der Gebäudeeigentümer, Jahreseinkommen sowie der Ausbildungsgrad signifikante Einflussfaktoren. Auch wenn die Ergebnisse kein Bewertungssystem für Energieeffizienzmaßnahmen darstellen, verdeutlichen diese die Bedeutung von weiteren Einflussfaktoren im Entscheidungsprozess von Energieeffizienzmaßnahmen, die sich nicht ausschließlich auf die Maßnahmen selbst beziehen. (Nair et al. 2010)

**Nehler (2016)** fokussiert sich in ihrer Dissertation auf nichtenergetische Vorteile von Energieeffizienzmaßnahmen am Beispiel von Druckluftsystemen. Die Arbeit kombiniert eine Literaturrecherche, Fragebögen sowie Einzelinterviews von Unternehmen, um die nichtenergetischen Vorteile von Energieeffizienzmaßnahmen in Druckluftsystemen zu identifizieren. Die identifizierten Vorteile sind größtenteils bezogen auf verbesserte Arbeitsbedingungen, verbesserten Betrieb und Instandhaltung sowie die Reduktion von Emissionen. Fazit von Nehler ist, dass nichtenergetische Vorteile bislang kaum von Unternehmen bei der Entscheidungsfindung einbezogen werden, selbst wenn diese bekannt und monetarisiert werden können. Als Grund wird genannt, dass Unternehmen oftmals Wissen zur Bewertung und Monetarisierung nichtenergetischer Vorteile fehlt. Nehler schlägt vor, nichtenergetische Vorteile weiter und vor allem spezifisch zu untersuchen, um deren Bedeutung für Unternehmen stärker hervorheben zu können. (Nehler 2016)

**Tallini et al. (2016)** fokussieren sich auf Energie-KPIs, sogenannte EnPIs. Die Autoren entwickeln für ausgewählte Energieeffizienzmaßnahmenkategorien EnPIs, die über einen einzelnen Wert die Qualität einzelner Maßnahmen ausdrücken sollen. Mithilfe eines Regressionsmodells wird zudem die Abhängigkeit der EnPIs von einzelnen Parametern bestimmt. Die Autoren verfolgen nach eigenen Angaben das Ziel, die Effektivität von Energieeffizienzmaßnahmen transparenter zu machen. (Tallini et al. 2016)

**Trianni et al. (2014)** unterstellen, dass bedeutende Bewertungskriterien, etwa umweltbezogene Kriterien, noch nicht ausreichend bei der Entscheidung über

Energieeffizienzmaßnahmen berücksichtigt werden. In diesem Zuge präsentieren die Autoren ein eigenes Bewertungssystem. Das entwickelte Bewertungssystem umfasst folgende Bewertungskriterien:

- Wirtschaftliche Bewertungskriterien: Amortisationszeit, Investitionshöhe.
- Energiebezogene Bewertungskriterien: Energieeinsparung, Energieträger.
- Umweltbezogene Bewertungskriterien: Emissions- und Abfallvermeidung.
- Produktionsbezogene Bewertungskriterien: Produktivitätssteigerungen, veränderte Betriebs- und Instandhaltungskosten, Arbeitsbedingungen.

Das Bewertungssystem wird auf eine Reihe von Querschnittstechnologien angewandt. Bemerkenswert ist, dass die Autoren eine große Anzahl der Bewertungskriterien für den Großteil der Datensätze nicht evaluieren können, etwa für Produktivitätssteigerungen, Abfallvermeidung sowie Betriebs- und Instandhaltungskosten, da für diese keine Daten zur Verfügung stehen. (Trianni et al. 2014)

In einer Studie des **Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie (2018)** werden bislang genutzte Kosten-Nutzen-Analysen von Energieeffizienzmaßnahmen aufgegriffen und zu einer sogenannten erweiterten Kosten-Nutzen-Analyse weiterentwickelt. Ausgangsbasis ist eine einfache Kosten-Nutzen-Analyse, welche die Bewertungskriterien eingesparte Energiekosten sowie energetische Zusatzinvestitionen umfasst. In einer Erweiterung werden die energetischen Zusatzinvestitionen um Transaktionskosten erweitert. Hierfür erfolgt zunächst eine qualitative Beschreibung der wichtigsten Hemmnisse, die in einem weiteren Schritt möglichst in quantitative Transaktionskosten überführt werden. Einbezogen werden auch qualitativ beschriebene Risiken. Hervorzuheben ist die Verknüpfung von Hemmnissen und Kosten für Unternehmen. Hierdurch kann der Anteil der Transaktionskosten für bestimmte Maßnahmenkategorien sichtbar gemacht und Strategien für deren Abbau entwickelt werden. (Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH 2018)

Aus Sicht der **relevanten Normen und Leitfäden** liefert insbesondere DIN 16247 Anhaltspunkte für die Bewertung, ebenso die Präzisierung im Leitfaden zur Erstellung von

Energieaudit-Berichten nach den Vorgaben der DIN EN 16247-1 und den Festlegungen des Bundesamtes für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) für die Erstellung eines Energieaudit-Berichts nach DIN EN 16247.

Innerhalb dieser wird gefordert, Möglichkeiten der Verbesserung der Energieeffizienz hinsichtlich verschiedener Gesichtspunkte zu evaluieren (Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle 2020, S. 35–36; DIN EN 16247-1:2012-01):

- Erforderliche Anschaffungskosten, ggf. um Zuschüsse gekürzt. Bei umfassenden Sanierungen wie dem Austausch von Fertigungsanlagen wird empfohlen, den energierelevanten Investitionsanteil zu berücksichtigen.
- Finanzielle Einsparungen.
- In Absprache mit dem Unternehmen relevante ökonomische Bewertungskriterien, etwa die Anlagenrendite (ROI).
- Andere mögliche, nicht energiebezogene Gewinne (beispielsweise hinsichtlich der Produktivität oder Instandhaltung).
- Technische Wechselwirkungen zwischen mehreren Maßnahmen.

Weitere Kriterien können aus dem Leitfaden Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle ergänzt werden (Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle 2020, S. 35–36):

- Annahmen für die Energiepreissteigerungen, um auch Berechnungen mit einer dynamischen Berücksichtigung durchführen zu können.
- Relevante Nutzungsdauer, Abschreibungsdauer und kalkulatorischer Zinssatz der Maßnahme.
- Weitere Kriterien beziehen sich auf dynamische Betriebs- sowie Wartungs- und Instandsetzungskosten.

### 3.2.3. Risikobewertung von Energieeffizienzmaßnahmen

**Forouli et al. (2019)** betrachten politische Fördermaßnahmen, die auf eine Steigerung der Energieeffizienz abzielen, unter Einbeziehung von Risiken. Die Bewertung der

Fördermaßnahmen bezieht die Energieeinsparung sowie Implementierungsrisiken ein. Die Risikobewertung wird mithilfe einer Fuzzy-Logik-basierten TOPSIS-Methode unter Einbeziehung von Gruppenentscheidungen durchgeführt, durch die jeder Fördermaßnahme ein Risikoindex zugeordnet wird. Die Bewertung der Energieeinsparungen basiert auf einem bestehenden Modell des griechischen Umwelt- und Energieministeriums. Durch Anwendung der Portfoliotheorie nach Markowitz wird, angelehnt an Investitionsportfolios, die paretoeffiziente Front an Fördermaßnahmen ermittelt. Die Autoren wenden das Verfahren an den Energiesparzielen Griechenlands für die Jahre 2018–2020 sowie 15 unterschiedlichen Fördermaßnahmen, etwa der Erneuerung von Straßenbeleuchtung oder Energieeffizienzprogrammen für öffentliche Gebäude, an. (Forouli et al. 2019)

**Heo et al. (2011)** präsentieren einen Ansatz für die Risikoanalyse von Energieeffizienzprojekten durch die Anwendung der bayesschen Kalibrierung von Gebäudeenergiemodellen. Im Rahmen des Verfahrens werden unsichere Faktoren innerhalb des Gebäudemodells zunächst mithilfe von Expertenwissen quantifiziert und die vier wichtigsten Parameter identifiziert. Die Autoren argumentieren, dass durch die bayessche Kalibrierung sowohl Unsicherheiten der Parameter, Unsicherheiten in Bezug auf das Modellverhalten sowie Beobachtungsfehler einbezogen werden können. Die Autoren wenden das vorgeschlagene Modell an drei unterschiedlichen Energieeffizienzmaßnahmen an und geben etwa für die Investitionshöhe eine Schätzung für deren minimale und maximale Höhe an. (Heo et al. 2011)

**Hill (2019)** betrachtet Risiken bei der monetären Investitionsentscheidung von Energieeffizienzmaßnahmen. Er nennt die Verwendung von außerordentlich hohen Diskontierungsfaktoren als eine oftmals verwendete Praxis bei der Bewertung von Energieeffizienzprojekten. Als Möglichkeit wird der Risikotransfer genannt, mit dem Ziel, das Risiko einzelner Energieeffizienzmaßnahmen über eine große Anzahl an Maßnahmen, etwa in Form einer Versicherung, zu verteilen. (Hill 2019)

**Jackson (2010)** überträgt den aus dem Finanzwesen bekannten Value-at-Risk-Ansatz (VaR) auf die Energieeffizienz und entwickelt ein sogenanntes Energy-Budget-at-Risk. Dieses bezieht historische Energieverbrauchsdaten, Wetterdaten, Energiepreise sowie

weitere Daten ein, um hierdurch ein 95%-Konfidenzintervall, etwa für die minimale Energieeinsparung, zu ermitteln. Jackson geht davon aus, dass durch diese Ermittlung insbesondere finanziell getriebene Entscheidungsträger von der Attraktivität von Energieeffizienzmaßnahmen überzeugt werden können. (Jackson 2010)

Im Rahmen des EU-Förderprogramms für Forschung und Innovation Horizon 2020 wurde das Projekt „EE Invest“ mit dem Ziel der Risikoreduktion von Investitionen in Energieeffizienzmaßnahmen im Gebäudesektor gefördert. Ziel des Projekts ist die Entwicklung einer Plattform für die Bewertung der Risiken von Energieeffizienz-Investitionen für Gebäude. Der Anwender gibt über die Plattform Energieeffizienzmaßnahmen sowie weitere Kontextdaten ein. Basierend auf diesen Daten wird im Anschluss eine automatisierte Risikoanalyse durchgeführt. Durch den zusammenhängenden Projektbezug werden nachfolgend die darin entstandenen Teilaspekte gesammelt vorgestellt. **Loureiro et al. (2020, 2021)** stellen die grundlegenden Ziele des Projekts vor und motivieren die Bedeutung der Risikobewertung und -reduktion bei der Investition in Energieeffizienzprojekten für Gebäude. Ziel ist die Entwicklung von Modellen für die Bewertung von technischen und finanziellen Risiken (Loureiro et al. 2020; Loureiro et al. 2021). **Andaloro et al. (2021)** präsentieren das grundlegende Framework für die Evaluierung der finanziellen Auswirkungen bei der Umsetzung von Energieeffizienzmaßnahmen in Gebäuden. Im Rahmen des Ansatzes werden technische und finanzielle KPIs definiert, mit deren Hilfe Risiken bewertet werden. Technische KPIs sind der mögliche Schaden in Prozent der Investitionshöhe sowie die Abweichung der Energieeinsparung von den Berechnungen. Finanzielle KPIs beziehen sich auf relevante finanzielle Bewertungskriterien wie den Kapitalwert und die statische Amortisationszeit. Für jedes relevante Gebäudeelement werden die Risiken anhand der KPIs auf einer vierwertigen Skala für Auswirkung und Eintrittswahrscheinlichkeit bewertet. Die technischen KPIs fließen in eine Monte-Carlo-Simulation ein, in der die Risiken ebenfalls monetarisiert werden. (Andaloro et al. 2021).

**Koutsandreas et al. (2022)** führen eine systematische Literaturanalyse durch, die sich auf Veröffentlichungen fokussiert, welche sich mit Risiken bei der Finanzierung von Energieeffizienzprojekten befassen. Die Ergebnisse legen nahe, dass regulatorische,

technische und finanzielle Risiken zu den am meisten genannten Risiken in Bezug auf die Finanzierung von Energieeffizienzprojekten gehören. Im weiteren Vorgehen werden unterschiedliche Strategien zur Risikovermeidung bei der Finanzierung von Energieeffizienzprojekten vorgestellt. Die Autoren kommen zu dem Schluss, dass noch immer ein großes Forschungsdefizit existiert, da sich bisherige Veröffentlichungen vor allem auf einzelne Risikofaktoren und nicht auf systematisches Vorgehen konzentrieren. (Koutsandreas et al. 2022)

**Stevens et al. (2018)** befassen sich mit Risiken und Unsicherheiten bei Energieeffizienzmaßnahmen in Wohngebäuden. Die Autoren unterscheiden zwischen quantifizierbaren und nicht-quantifizierbaren Risiken und stellen diese zunächst vor. Unterscheidungsmerkmal ist demnach, dass nicht-quantifizierbare Risiken nicht direkt vermieden oder kontrolliert werden können und in der Regel nicht in ihrer Auswirkung vorhersehbar sind. Genannt werden etwa regulatorische Risiken, Marktrisiken und verhaltensbezogene Risiken. Für die Risikobewertung der quantifizierbaren Risiken schlagen die Autoren eine Monte-Carlo-Simulation vor, um mit deren Hilfe den Einfluss und die Auswirkung der einzelnen Risiken zu ermitteln. Als Zielgröße wird in der Simulation die Eigenkapitalrendite verwendet. (Stevens et al. 2018)

**Thompson (1997)** befasst sich mit den Risiken bei der Diskontierung von Zahlungsströmen von Energieeffizienzmaßnahmen. Ausgangspunkt ist die bereits vorgestellte Beobachtung von sehr hohen Diskontierungsfaktoren in der Energieeffizienz, durch die Risiken abgebildet werden. Der Autor argumentiert, dass eine modifizierte Kapitalwertmethode verwendet werden sollte, um die Risiken von Energieeffizienzmaßnahmen präziser abzubilden. (Thompson 1997)

**Togashi (2018)** präsentiert eine auf einer Monte-Carlo-Simulation basierende Risikoanalyse von Energieeffizienz-Investitionen für Gebäude. Die Simulation basiert auf einem stochastischen Energieverbrauchsmodell für ein Bürogebäude. Dieses bezieht etwa das Wetter sowie das Verhalten der Büroarbeitenden ein, welches mithilfe eines Fragebogens ermittelt wurde. Weitere modellierte Einflussfaktoren sind Energiekosten sowie Mieterwechsel. Das Modell wird als Grundlage für eine Monte-Carlo-Simulation verwendet, bei der die erwarteten diskontierten Zahlungsströme von

Energieeffizienzmaßnahmen simuliert werden. Hierdurch kann die Bandbreite der Zahlungsströme ermittelt werden. (Togashi 2018)

**Töppel et al. (2019)** befassen sich mit der Quantifizierung von Risikovermeidungsstrategien bei Energieeffizienz-Investitionen durch Versicherungen und Einspar-Contracting-Modelle. Die Autoren evaluieren die Effekte dieser Vermeidungsstrategien durch ein Modell, mit dessen Hilfe die Verteilung der Energiekosteneinsparungen ermittelt wird, und ziehen das Fazit, dass die Verwendung der beiden Strategien einen positiven Einfluss auf das Investitionsverhalten in Energieeffizienzmaßnahmen hat. (Töppel et al. 2019)

### 3.3. Zusammenfassung und Zwischenfazit

Die vorgestellten Ansätze zur optimalen Auswahl von Energieeffizienzmaßnahmen zeigen zum überwiegenden Anteil einen Bezug zu Energieeffizienzmaßnahmen im Gebäudesektor und verfolgen unterschiedliche Ansätze für eine optimierte Auswahl. In einigen der gesichteten Ansätze werden Maßnahmen explizit modelliert, also für zuvor bekannte Energieeffizienzmaßnahmen ausgelegt. Bei der Maßnahmenbewertung ist eine fehlende Einbeziehung von Risiken und Wechselwirkungen im Großteil der Ansätze zu beobachten. Lediglich Dehning und Flatau betrachten in ihren Dissertationen Wechselwirkungen bei der Auswahl von Energieeffizienzmaßnahmen. In Bezug auf die Einbeziehung von Risiken findet sich lediglich eine Betrachtung von Entscheidungen unter Unsicherheiten in einzelnen Veröffentlichungen. Eine generische Maßnahmenmodellierung ist in einem Teil der gesichteten Ansätze vorzufinden, bzw. lässt sich durch eine Modifizierung ohne höheren Aufwand implementieren.

In Bezug auf das Entscheidungsmodell ist in mehr als der Hälfte der betrachteten Entscheidungsmodelle eine multikriterielle Betrachtung gegeben, wobei eine Gewichtung von Entscheiderpräferenzen nur in wenigen Ansätzen möglich ist, namentlich Le Wang et al. (2020) sowie Li et al. (2022). Eine Eignung für unterschiedliche Systemebenen der Fabrik ist in einem Teil der gesichteten Entscheidungsmodelle möglich, bzw. kann durch leichte Modifikation umgesetzt werden.



Bei der Teilmenge an Ansätzen mit einer Fokussierung auf Modellierung und Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen zeigt sich eine hohe Bandbreite an unterschiedlichen Bewertungssystemen. Neben anerkannten Normen wie DIN ISO16247 werden in den gesichteten Ansätzen verschiedene Bewertungssysteme motiviert und vorgestellt. Es zeigt sich jedoch eine grundsätzliche Tendenz hin zu multikriteriellen Bewertungsmethoden.

Die Sichtung von Ansätzen zur Risikobewertung von Energieeffizienzmaßnahmen zeigt einen starken Fokus auf finanzielle Risiken. Eine Einbeziehung von technischen Risiken ist nur in einzelnen Ansätzen gewährleistet. Für die Risikobewertung werden in verschiedenen Ansätzen Monte-Carlo-Methoden verwendet.

## 4. Reflexion des Stands der Technik und der Wissenschaft

Nachfolgend ist aufbauend auf dem zu definierenden Gegenstandsbereich zu untersuchen, wie die vorgestellten Ansätze des Stands der Technik und der Wissenschaft die zuvor abzuleitenden Anforderungen erfüllen. Anschließend erfolgt eine Ableitung des sich daraus ergebenden Handlungsbedarfs.

### 4.1. Definition des Gegenstandsbereichs

Nachfolgend wird zunächst der Gegenstandsbereich der zu entwickelnden Methode aufgezeigt und begründet. Dabei muss grundsätzlich zwischen drei unterschiedlichen Dimensionen des Gegenstandsbereichs unterschieden werden. Diese sind angelehnt an den von Schenk definierten Gegenstandsbereich der Fabrik (Schenk et al. 2014, S. 145).

In Bezug auf den Gegenstandsbereich ist festzuhalten, dass dieser alle in Kapitel 2.1.4, definierten **Systemebenen der Fabrik** einschließt. Aus Sicht der Entscheider können Energieeffizienzmaßnahmen auf allen Systemebenen geplant werden, wodurch ein Entscheidungsmodell für die Optimierung der Auswahl für alle Systemebenen der Fabrik geeignet sein muss. Eine Beschränkung auf bestimmte Ebenen erscheint für die gewählte Forschungsfrage weder zielführend noch begründbar.

Die zweite zu untersuchende Dimension des Gegenstandsbereichs umfasst die **Energieeffizienzmaßnahmen in der Fabrik** selbst, deren Auswahl im Rahmen des Entscheidungsmodells optimiert werden soll. Eine Einschränkung des Gegenstandsbereichs bezieht sich auf solche Energieeffizienzmaßnahmen, deren Auswirkung vor der Durchführung quantifizierbar sind. Die Einschränkung lässt sich direkt aus dem Gesetz über Energiedienstleistungen und andere Energieeffizienzmaßnahmen ableiten, in dem gefordert wird, dass Energieeffizienzmaßnahmen „[...] zu überprüfbaren und der Höhe nach mess- oder schätzbaren Energieeffizienzverbesserungen führen“ (EDL-

G 2010). Exemplarische Maßnahmen, für die dies nicht der Fall ist, sind nicht-technische Maßnahmen, etwa die Sensibilisierung der Belegschaft, die zwar eine hohe Bedeutung für eine erfolgreiche Energieeffizienz-Strategie im Unternehmen haben, deren Auswirkung aber vor der Umsetzung nicht quantifizierbar erscheint. Bezugnehmend auf die in Kapitel 2.4.2 vorgestellte Klassifizierung nach Löbke et al. (2019) werden daher ausschließlich die beiden Energieeffizienzmaßnahmen-Kategorien **„technisch-investiv“** sowie **„technisch-organisatorisch“** betrachtet, da diese die Eigenschaft der vorherigen Quantifizierung erfüllen. Ausgeschlossen sind nicht-technische Maßnahmen im Sinne der Kategorisierung sowie Maßnahmen, welche von dem individuellen Entscheider als prinzipiell geeignet betrachtet werden.

Dritte relevante Dimension des Gegenstandsbereichs ist die Eingrenzung in die Phasen des in Kapitel 2.1.3 vorgestellten **Fabriklebenszyklus**. Innerhalb dieses Zyklus fokussiert sich das Entscheidungsmodell auf die beiden Phasen des **Betriebs** sowie der **Sanierung** der Fabrik. Da der kontinuierliche Verbesserungsprozess Bestandteil des Betriebs einer Fabrik ist, kann die Steigerung der Energieeffizienz darin verortet werden. Ebenso kann argumentiert werden, dass die verwendete Definition der Sanierung als *„Verbesserung des Systems auf einen alten Leistungszustand“* ebenfalls Energieeffizienzmaßnahmen umfassen kann. Ebenfalls bezugnehmend auf die Definition von Energieeffizienzmaßnahmen als *„[...] Maßnahmen, die in der Regel zu überprüfbar und der Höhe nach mess- oder schätzbar Energieeffizienzverbesserungen führen“*, werden die vorgelagerten Schritte des Fabriklebenszyklus im Gegenstandsbereich des Modells ausgeklammert, da diese keine Verbesserung darstellen (EDL-G 2010).

Eine Visualisierung des so definierten Gegenstandsbereichs findet sich in Abbildung 24.

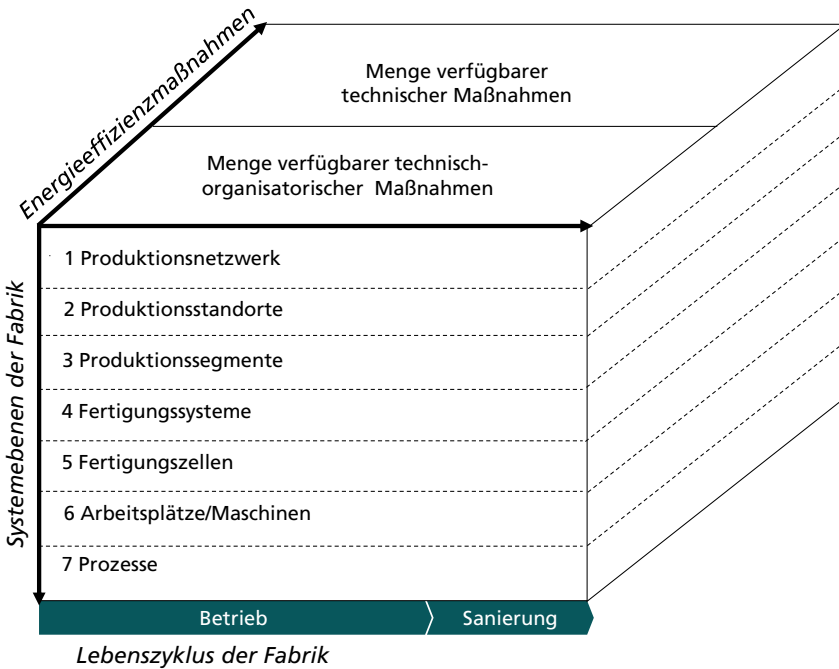


Abbildung 24: Aufgespannter Gegenstandsreich des Entscheidungsmodells

#### 4.2. Ableitung der Anforderungen

Für die Einordnung der bestehenden Ansätze müssen zunächst Anforderungen an die Forschungsfragen begründet werden. Angelehnt an die Teilforschungsfragen gliedert sich die Ableitung der Anforderungen in drei Dimensionen:

- Anforderungen an das Entscheidungsmodell,
- Anforderungen an die Maßnahmenbewertung,
- Anforderung an die Risikobewertung von Energieeffizienzmaßnahmen.

Ziel ist es, durch die Ableitung und Begründung der relevanten Anforderungen den Lösungsraum der übergeordneten Forschungsfrage im Allgemeinen und der untergeordneten Teilforschungsfragen im Speziellen genauer zu charakterisieren und

festzulegen und die erste Forschungsfrage bezüglich der Anforderungen an ein Entscheidungsmodell für die Bestimmung von optimalen Investitionsprogrammen von Energieeffizienzmaßnahmen in der Fabrik zu beantworten.

#### 4.2.1. Anforderungen an das Entscheidungsmodell

*Multikriterielle Zielfunktion:* Durch die Existenz von mehr als einem Zielkriterium ist von einer multikriteriellen Entscheidung auszugehen. Wie in Kapitel 2.3.5 gezeigt, ist dies im Allgemeinen häufig in der Projektbewertung der Fall. Konkret ergeben sich hierdurch bei der optimalen Auswahl von Energieeffizienzmaßnahmen weitere nichtmonetäre Ziele. So wird die Anforderung an minimale Kosten in der Regel in einem Konflikt mit einer möglichst hohen Steigerung der Energieeffizienz stehen. Hierdurch muss die optimale Maßnahmenauswahl auf einer multikriteriellen Zielfunktion basieren.

*Variable Gewichtung von Entscheiderpräferenzen:* Wie Vorarbeiten von Cooremans (2012) zeigen, gewichten Entscheidungsträger die Zieldimensionen in den Entscheidungsprozessen der Energieeffizienz unterschiedlich. Die in Kapitel 2.4.3 vorgestellten Untersuchungen von Entscheidungsprozessen zeigen eine Heterogenität in der Ausprägung der Gewichtung der einzelnen Zieldimensionen. Dies lässt sich als Hinweis dafür werten, im Entscheidungsmodell von einer variablen Zielgewichtung auszugehen, um ebendiesem Umstand Sorge zu tragen. Das zu entwickelnde Entscheidungsmodell muss dem Rechnung tragen und eine individuelle Gewichtung der Ziele ermöglichen.

*Eignung für unterschiedliche Systemebenen:* Bezugnehmend auf die in Kapitel 2.1.4 vorgestellten Systemebenen der Fabrik muss das Entscheidungsmodell für den Einsatz in allen Systemebenen von der Prozessebene bis zur Ebene der Produktionsnetzwerke geeignet sein.

*Berücksichtigung von unternehmerischen Nebenbedingungen:* Die Entscheidung über die Auswahl von Energieeffizienzmaßnahmen erfolgt nicht isoliert, sondern unter Einbeziehung von Nebenbedingungen, die als Randbedingungen in die Auswahl mit einfließen müssen. Dies können etwa das vorhandene Investitionsbudget, minimal zu erfüllende Energieeinsparungen oder Mindestanforderungen für bestimmte

Maßnahmenkategorien sein. Die relevanten Nebenbedingungen müssen bei der Auswahl der Maßnahmen berücksichtigt und eingehalten werden.

#### 4.2.2. Anforderungen an die Maßnahmenbewertung

*Berücksichtigung von Risiken:* Die Umsetzung von Energieeffizienzmaßnahmen ist mit Risiken nach DIN ISO 31000 verbunden, die etwa technischer oder wirtschaftlicher Art sind. Da diese die Entscheidungsfindung beeinflussen, müssen sie in Form von Bewertungskriterien einbezogen werden. Die Bedeutung von Risiken bei der Entscheidung für Energieeffizienzmaßnahmen wird in der Literatur hervorgehoben (Jackson 2010; Rohdin et al. 2007, S. 673–674; Killip et al. 2019, S. 306). Die Notwendigkeit einer differenzierten Betrachtung von Investitionsrisiken, die in der Regel projektindividuell durchgeführt werden muss, wird auch vonseiten des Energiecontrollings hervorgehoben (Gleich 2014, S. 71).

*Einbeziehung von Wechselwirkungen:* Energieeffizienzmaßnahmen können sich in ihren Wirkeffekten gegenseitig beeinflussen. Bei der optimierten Auswahl von Maßnahmenbündeln muss dies durch eine Methode zur Wechselwirkungsbewertung berücksichtigt werden. Die Notwendigkeit der Einbeziehung von Wechselwirkungen ergibt sich ebenfalls aus DIN 16247-1, in der technische Wechselwirkungen zwischen mehreren Maßnahmen als ein zu evaluierender Gesichtspunkt genannt werden.

*Generische Modellierung von Energieeffizienzmaßnahmen:* Energieeffizienzmaßnahmen sind durch ein hohes Spektrum an unterschiedlichen, teilweise branchenspezifischen Maßnahmen charakterisiert. Das Entscheidungsmodell muss diese Komplexität berücksichtigen und eine generische Modellierung für Energieeffizienzmaßnahmen ermöglichen. Dies bedeutet, dass das verwendete Maßnahmenmodell auf alle Arten von Energieeffizienzmaßnahmen angewandt werden kann, die sich innerhalb des in Kapitel 4.1 definierten Gegenstandsbereichs befinden.

Auf einer übergeordneten Ebene gelten zudem die grundlegenden von Fleiter et al. entwickelten Anforderungen an Bewertungskriterien von Energieeffizienzmaßnahmen, welche in Teilen mit den in Kapitel 2.3.4 vorgestellten allgemeinen Anforderungen an

Zielsysteme von Keeney und Eisenführ übereinstimmen (Eisenführ et al. 2003, S. 50, Fleiter et al. 2012a, S. 503, Keeney 1992, S. 82):

- Relevanz: Die gewählten Bewertungskriterien sollten die Einführung von Energieeffizienzmaßnahmen beeinflussen.
- Anwendbar: Die Kriterien sollten allgemein genug sein, um für viele unterschiedliche Energieeffizienzmaßnahmen geeignet zu sein.
- Spezifisch: Die Kriterien sollten so spezifisch bleiben, dass sie möglichst konkret und objektiv ausgewertet werden können.
- Unabhängig: Die Kriterien sollten unabhängig von Firma oder anderen kontextuellen Faktoren sein, um die Vergleichbarkeit zwischen Energieeffizienzmaßnahmen zu gewährleisten:
- Unterscheidbar: Die Kriterien sollten sich nicht überschneiden und voneinander unterscheiden.

#### 4.2.3. Anforderung an die Risikobewertung

Aufgrund der individuellen Charakterisierung von Energieeffizienzmaßnahmen und der potenziell hohen Menge an zur Verfügung stehenden Maßnahmen müssen diese sowohl *quantitativ als auch qualitativ* ohne notwendigerweise vorhandene Kenntnisse von Schadensausmaß und Eintrittswahrscheinlichkeit der Einzelrisiken *bewertbar* sein.

Für die Bestimmung des Gesamtrisikos müssen die *Wechselwirkungen der Risiken* zueinander *bewertbar* sein. Durch die gegenseitige Beeinflussung von Einzelrisiken kann das Gesamtrisiko einer einzelnen Energieeffizienzmaßnahme erhöht sein. Die Risikobewertung muss demnach auch Wechselwirkungen zwischen Einzelrisiken bewerten können.

#### 4.3. Einordnung der betrachteten Ansätze

Aufbauend auf den zuvor abgeleiteten Anforderungen werden die im Stand der Technik und der Wissenschaft gesichteten Ansätze eingeordnet. Ziel ist es, Aussagen zu

gewinnen, in welchen Teilen die aufgeworfenen Anforderungen bereits erfüllt sind und wo noch offener Handlungsbedarf besteht.

Die Bewertung der Ansätze hinsichtlich der Erfüllung der Anforderungen erfolgt in drei Stufen: Anforderungen die in keinsten Weise erfüllt sind, werden mit „**nicht erfüllt**“ bewertet. Die Stufe „**vollständig erfüllt**“ geht meiner vollständigen Erfüllung der Anforderung einher. Im Zuge einer pragmatischen Bewertung wird auf eine stetige Bewertung verzichtet und Zwischenstufen mit „**teilweise erfüllt**“ gewertet, was eine teilweise, aber nicht vollständige, Erfüllung der betrachteten Anforderung bedeutet.

Analog zum in Abbildung 22 dargestellten methodischen Vorgehen zur Sichtung des Stands der Technik und der Wissenschaft werden die gesichteten Ansätze nachfolgend eingeordnet.

Zunächst werden Ansätze bewertet, die sich auf die **optimale Auswahl von Energieeffizienzmaßnahmen beziehen**. Anschließend wird die Teilmenge der Ansätze bewertet, die sich ausschließlich mit einer **Maßnahmenmodellierung und -bewertung** befassen. Abschließend werden **Ansätze zur Risikobewertung von Energieeffizienzmaßnahmen** betrachtet. Neben den in Kapitel 3.2.3 vorgestellten Ansätzen zur Risikobewertung von Energieeffizienzmaßnahmen wird die Teilmenge der Ansätze aus Kapitel 3.2.1 und Kapitel 3.2.2 einbezogen, die teilweise oder vollständig Risiken in die Auswahl und Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen einbeziehen.

Bewertet man Ansätze, die eine optimierte Maßnahmenauswahl betrachten, ist zunächst bezüglich der Anforderungen an die Maßnahmenbewertung eine fehlende Einbeziehung von Risiken und Wechselwirkungen zu beobachten. Lediglich Dehning und Flatau betrachten in ihren Dissertationen Wechselwirkungen bei der Auswahl von Energieeffizienzmaßnahmen. In Bezug auf die Einbeziehung von Risiken findet sich lediglich eine Betrachtung von Entscheidungen unter Unsicherheiten in einzelnen Veröffentlichungen. Eine generische Maßnahmenmodellierung ist in einem Teil der gesichteten Ansätze vorzufinden, bzw. lässt sich durch eine Modifizierung ohne höheren Aufwand implementieren. Bei den Anforderungen an das Entscheidungsmodell ist in mehr als der Hälfte der betrachteten Entscheidungsmodelle eine multikriterielle Betrachtung gegeben, wobei eine Gewichtung von Entscheiderpräferenzen nur in



wenigen Ansätzen möglich ist, namentlich Le Wang et al. (2020) sowie Li et al. (2022). Eine Eignung für unterschiedliche Systemebenen der Fabrik ist in einem Teil der gesichteten Entscheidungsmodelle möglich, beziehungsweise kann durch leichte Modifikation umgesetzt werden.

Unternehmerische Nebenbedingungen werden in verschiedenen Ansätzen explizit betrachtet und können in weiteren durch Ergänzungen einbezogen werden. In den genannten Ansätzen werden die in Tabelle 7 zusammengefassten Nebenbedingungen einbezogen. Hervorzuheben ist die Verwendung von weiteren Nebenbedingungen, die sich etwa auf Designparameter von Gebäuden beziehen. Diese wurden nicht als unternehmerische Nebenbedingungen aufgefasst.

Tabelle 7: In der Literatur genannte unternehmerische Nebenbedingungen

Nebenbedingung	Anzahl Nennungen	Autoren
Investitionsbudget	9	Ascione et al. 2015; Cano et al. 2014; He et al. 2019; Malatji et al. 2013; Mokhtar et al. 2020; Solmaz et al. 2018; Tan et al. 2016; Üçtuğ et al. 2012
Energieeinsparziele	2	He et al. 2019; Malatji et al. 2013
Amortisationszeit	2	Malatji et al. 2013; Mokhtar et al. 2020
Emissionsziele	1	Cano et al. 2014; He et al. 2019
Kapitalwert	1	Malatji et al. 2013

Ebenso ist grundsätzlich ein geringer Fokus auf die Industrie beobachtbar. Der Großteil der gesichteten Ansätze bezieht sich auf den Gebäudesektor.

In Summe zeigt sich demnach, dass keiner der gesichteten Ansätze die geforderten Anforderungen in Gänze erfüllt und zumeist nur ein Teil der Anforderungen erfüllt wird. In Abbildung 25 sowie Abbildung 26 ist die Erfüllung der Anforderungen des gesichteten Stands der Technik und Wissenschaft in Bezug auf die optimierte Auswahl von Energieeffizienzmaßnahmen dargestellt.

Legende:  
 ● vollständig erfüllt  
 ◐ teilweise erfüllt  
 ○ nicht erfüllt

	Maßnahmen- bewertung			Entscheidungsmodell				
	Berücksichtigung von Risiken	Einbeziehung von Wechselwirkungen	Generische Maßnahmenmodellierung	Multikriterielle Zielfunktion	Gewichtung von Entscheiderpräferenzen	Eignung für unterschiedliche Systemebenen	Unternehmerischen Nebenbedingungen	Industriefokus
Ascione et al. (2015)	○	○	○	●	○	○	●	○
Bayata et al. (2017)	○	○	○	●	○	○	○	○
Bonilla-Campos (2020)	○	○	○	●	◐	○	○	●
Bre et al. (2017)	○	○	○	●	○	○	○	○
Cano et al. (2014)	●	○	○	○	○	◐	●	○
Dehning (2017)	○	●	●	◐	○	◐	○	●
Diakaki et al. (2010)	○	○	○	●	◐	○	◐	○
Eskander et al. (2017)	○	○	○	●	○	○	○	○
Flatau (2019)	○	●	○	○	○	○	○	●
Haag (2013)	○	●	○	○	○	◐	○	●
He et. al. (2019)	○	○	○	◐	◐	○	●	○
Hirzel (2015)	◐	○	●	○	○	●	○	●
Karmellos et al. (2015)	○	○	○	●	○	◐	◐	○
Kontogirgos et al. (2018)	◐	○	◐	●	○	●	●	○
Le Wang et al. (2020)	○	○	◐	●	●	◐	○	○
Li et al. (2022)	○	○	○	●	●	◐	◐	○

Abbildung 25: Bewertung der Ansätze zur optimierten Auswahl von Energieeffizienzmaßnahmen (1 von 2)

	Maßnahmen- bewertung			Entscheidungsmodell				
	Berücksichtigung von Risiken	Einbeziehung von Wechselwirkungen	Generische Maßnahmenmodellierung	Multikriterielle Zielfunktion	Gewichtung von Entscheiderpräferenzen	Eignung für unterschiedliche Systemebenen	Unternehmerischen Nebenbedingungen	Industriefokus
Malatji et al. (2013)	○	○	◐	●	●	◐	●	○
Mikučionienė et al. (2014)	○	○	○	◐	○	◐	○	○
Mokhtar et al. (2020)	○	○	◐	◐	○	○	●	●
Neves et al. (2008)	○	○	○	◐	○	○	◐	○
Penna et al (2015)	○	○	○	◐	◐	◐	○	○
Ribas et al. (2015)	○	○	◐	◐	○	◐	○	○
Schieberle (2019)	◐	○	○	◐	○	○	○	○
Solmaz et al (2018)	○	○	○	●	◐	◐	●	○
Schnellbach (2015)	○	○	○	◐	○	◐	○	○
Sztubecka et al. (2020)	○	○	○	●	●	○	○	○
Tan et al (2016)	○	○	○	○	○	◐	●	○
Taylan et al. (2016)	○	○	○	●	○	○	○	○
Thiede (2011)	○	○	◐	●	○	●	◐	●
Üçtuğ et al. (2012)	○	○	○	◐	○	○	●	○
Wang et al. (2017)	◐	○	○	◐	○	◐	○	○
Weeber (2022)	◐	○	●	◐	○	◐	○	●
Weskamp (2018)	◐	◐	●	○	○	◐	○	●
Yu et al. (2015)	○	○	○	◐	○	◐	○	○

Legende:

- vollständig erfüllt
- ◐ teilweise erfüllt
- nicht erfüllt

Abbildung 26: Bewertung der Ansätze zur optimierten Auswahl von Energieeffizienzmaßnahmen (2 von 2)

In Bezug auf die Teilmenge der Veröffentlichungen, welche sich auf die Modellierung und Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen fokussieren, zeigt sich bei den Anforderungen ebenfalls ein Mangel bei der Berücksichtigung von Risiken. Trotz der in der Literatur hervorgehobenen Bedeutung werden Risiken lediglich von Nehler (2016) teilweise betrachtet. Eine Einbeziehung von Wechselwirkungen ist in keinem der gesichteten Ansätze gegeben, auch wenn dies in DIN EN 16247 grundsätzlich gefordert ist. Eine generische Maßnahmenmodellierung ist in zwei der gesichteten Ansätze teilweise und im Fall von Fleiter et al. (2012a) vollständig gegeben. In Abbildung 27 die Erfüllung der Anforderungen Teilmenge der Veröffentlichungen, welche sich auf die Modellierung und Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen fokussieren dargestellt.

	Maßnahmenbewertung		
	Berücksichtigung von Risiken	Einbeziehung von Wechselwirkungen	Generische Maßnahmenmodellierung
Legende:			
● vollständig erfüllt			
◐ teilweise erfüllt			
○ nicht erfüllt			
Conrad (2020)	○	●	○
Cooremans (2012)	○	○	○
Fleiter et al (2012a)	○	○	●
Nair et al. (2010)	○	○	◐
Nehler (2016)	○	○	○
Trianni et al. (2014)	○	○	◐
Tallini et al. (2016)	○	○	○
Wuppertal Institut (2018)	◐	○	○

Abbildung 27: Bewertung der Ansätze zur Bewertung und Modellierung von Energieeffizienzmaßnahmen

---

Nachfolgend erfolgt eine Einordnung der Ansätze mit einem Bezug zu Risiken und deren definierten Teilanforderungen, welche in Abbildung 28 zusammengefasst ist.

Unterschieden werden die gesichteten Ansätze neben den Anforderungen auch nach dem gewählten Fokus. Dabei wird zwischen entscheidungstheoretischem Risikobegriff, einem Risikobegriff nach ISO 31000 sowie einer ausschließlich finanziellen Risikobetrachtung unterschieden. Einzuschränken ist, dass eine eindeutige Zuordnung zu den drei gewählten Kategorien nicht immer möglich ist und häufig Überschneidungen vorliegen.

Es zeigt sich ein hoher Fokus auf eine Betrachtung der Entscheidungsfindung unter Unsicherheit. Ansätze aus dieser Kategorie betrachten etwa Unsicherheiten in Bezug auf die Ausprägung bestimmter Parameter. Eine umfassende Risikobetrachtung findet sich lediglich bei dem im Rahmen des EU-Förderprogramms für Forschung und Innovation Horizon 2020 durchgeführten Projekt „EE Invest“. Der Ansatz von Andaloro et al. (2021) ermöglicht es, mithilfe einer Monte-Carlo-Simulation verschiedene Risiken und deren Wechselwirkungen zu betrachten. In Bezug auf die Anforderungen können in einem Teil der Ansätze Wechselwirkungen zwischen unterschiedlichen Risiken berücksichtigt werden. Dies ist insbesondere bei den Ansätzen der Fall, die eine Entscheidung unter Unsicherheit betrachten, da hierbei stochastische Ansätze verwendet werden. Eine sowohl qualitative als auch quantitative Bewertung von Risiken ist in Gänze in keinem der gewählten Ansätze vorgesehen. Durch Anpassungen können jedoch verwendete quantitative Ansätze und auch qualitativ gewonnene Daten einbezogen werden.

In Summe kann geschlossen werden, dass keiner der gesichteten Ansätze die definierten Anforderungen an die Risikobewertung erfüllt. Insbesondere bei Ansätzen für die Auswahl von Energieeffizienzmaßnahmen findet keine adäquate Betrachtung von Risiken abseits von Entscheidungen unter Unsicherheit statt.

Legende:  
 ● vollständig erfüllt  
 ◐ teilweise erfüllt  
 ○ nicht erfüllt

	Anforderungen		Fokus		
	Wechselwirkungen zwischen Risiken	Qualitative als auch quantitative Bewertung	Entscheidung unter Unsicherheit	Risikobegriff nach DIN ISO 31000	Ausschließlich Finanzielle Risikobetrachtung
Andalaro et al. (2021)	●	◐	○	◐	◐
Cano et al. (2014)	◐	○	●	○	○
Forouli et al. (2019)	○	○	◐	◐	○
Heo et al. (2011)	○	◐	●	○	○
Hill (2019)	○	○	○	○	●
Hirzel (2015)	○	○	●	○	○
Jackson (2010)	◐	◐	○	○	●
Kontogirgos et al. (2018)	○	○	●	○	○
Schieberle (2019)	◐	○	●	○	○
Stevens et al. (2018)	●	◐	○	○	●
Thompson (1997)	○	○	○	○	●
Togashi (2018)	●	○	○	○	●
Wang et al. (2017)	○	○	●	○	○
Wuppertal Institut (2018)	○	○	○	◐	○
Töppel et al. (2019)	○	○	○	○	●

Abbildung 28: Bewertung der Ansätze zur Risikobewertung von Energieeffizienzmaßnahmen

#### 4.4. Zusammenfassung des Handlungsbedarfs

Kapitel 4 beantwortet die erste Teilforschungsfrage bezüglich der Anforderungen an ein Entscheidungsmodell für industrielle Energieeffizienzmaßnahmen. Durch Ableitung der Anforderungen wurde hierdurch die erste Teilforschungsfrage der Arbeit beantwortet: Welche Anforderungen werden an ein Entscheidungsmodell für die optimierte Auswahl von Energieeffizienzmaßnahmen in der Fabrik gestellt? Es wurden zunächst die drei Betrachtungsdimensionen aufgespannt und für diese konkrete Anforderungen begründet. Diese basieren neben Vorarbeiten aus der bestehenden Literatur aus der höheren Anforderung an das zu entwickelnde Artefakt in Form von dessen Nützlichkeit. Um diese in der Praxis zu gewährleisten, wurden weitere Anforderungen an das Entscheidungsmodell motiviert und eingeführt. Es ergeben sich vier Anforderungen an das Entscheidungsmodell selbst, drei Anforderungen an die Maßnahmenbewertung ergänzt durch fünf Meta-Anforderungen an die Maßnahmenbewertung für Energieeffizienzmaßnahmen nach Fleiter et al. (2012a) sowie zwei Anforderungen an die Risikobewertung der Energieeffizienzmaßnahmen. Die Beantwortung der Teilforschungsfrage legt somit die Grundlage für die Einordnung der betrachteten Ansätze, die Ableitung des Handlungsbedarfs und mündet in die Entwicklung eines Entscheidungsmodells für die Bestimmung optimaler Investitionsprogramme von Energieeffizienzmaßnahmen in der Fabrik.

Die Bewertung des bisherigen Erkenntnisstands anhand der aus der Problemstellung abgeleiteten Anforderungen verdeutlicht, dass diese in Gänze noch nicht erfüllt sind. Die gesichteten Ansätze erfüllen in Teilen die abgeleiteten Anforderungen und liefern wichtige methodische Hilfestellungen für deren Erfüllung, sind aber einzeln nicht in der Lage, die gestellten Anforderungen zu erfüllen. Es fehlt ein durchgängiges Entscheidungsmodell zur Ermittlung des optimalen Investitionsprogramms von Energieeffizienzmaßnahmen, insbesondere auch die Einbeziehung von Risiken und Wechselwirkungen. Es zeigt sich zudem ein grundlegender Mangel an Entscheidungsmodellen, welche die zuvor definierten Anforderungen erfüllen. Keiner der betrachteten Ansätze formuliert die Auswahl von Energieeffizienzmaßnahmen in der Fabrik explizit in Form eines Entscheidungsmodells.

Nachfolgend wird basierend auf den in Kapitel 4.3 erkannten Defiziten der abgeleitete Handlungsbedarf zusammengefasst. Konkret besteht folgender Handlungsbedarf:

Handlungsbedarf bei der Maßnahmenbewertung:

- Einbeziehung von Risiken. Die Umsetzung von Energieeffizienzmaßnahmen ist mit Risiken verbunden, die etwa technischer oder finanzieller Art sind. Da diese einen Einfluss auf die Entscheidungsfindung haben, müssen sie bei einer optimierten Entscheidungsfindung einbezogen werden. Dies ist bislang in keinem gesichteten Entscheidungsmodell der Fall.
- Einbeziehung von Wechselwirkungen. Energieeffizienzmaßnahmen können die Ausprägung ihrer Effekte gegenseitig beeinflussen. Bei der optimierten Auswahl von Maßnahmenbündeln muss dies berücksichtigt werden.
- Generische Maßnahmenmodellierung: Durch die hohe Anzahl an individuellen Energieeffizienzmaßnahmen in der Fabrik muss eine Maßnahmenbewertung mithilfe einer generischen Modellierung erfolgen, die für alle Arten von Energieeffizienzmaßnahmen im Gegenstandsbereich geeignet ist.

Handlungsbedarf bei der Entwicklung eines Entscheidungsmodells:

- Die multikriterielle Natur der Entscheidung über Energieeffizienzmaßnahmen muss innerhalb eines Entscheidungsmodells abgebildet sein. Eine ausschließlich monetäre Bewertung ist nicht ausreichend für deren Auswahl.
- Es muss innerhalb des Entscheidungsmodells eine variable Gewichtung von Entscheiderpräferenzen gewährleistet sein, um die individuellen Präferenzen der Entscheider berücksichtigen zu können.
- Das Entscheidungsmodell muss für die unterschiedlichen Systemebenen der Fabrik, von der Prozessebene bis zur Ebene der Produktionsnetzwerke, geeignet sein.
- Nebenbedingungen müssen bei der optimierten Auswahl von Energieeffizienzmaßnahmen einbezogen werden, da diese innerhalb eines Spannungsfelds begrenzter Ressourcen erfolgt.



Das im nachfolgenden Kapitel zu entwickelnde Entscheidungsmodell schließt die beschriebene Defizit in Form des Erkenntnisziels durch Beantwortung der Forschungsfrage sowie des Gestaltungsziels in Form eines Artefakts. Die Grundlagen aus Kapitel 2 bilden hierfür die methodische Basis. Aus Kapitel 3 werden Teilaspekte der gesichteten Ansätze aufgegriffen und in das zu entwickelnde Entscheidungsmodell adaptiert

Die zuvor abgeleiteten Anforderungen sind in ihrer Strukturierung in Abbildung 29 zusammengefasst.

---

Entscheidungsmodell	Multikriterielle Zielfunktion
	Variable Gewichtung von Entscheiderpräferenzen
	Eignung für unterschiedliche Systemebenen
	Berücksichtigung von unternehmerischen Nebenbedingungen
Maßnahmen- bewertung	Berücksichtigung von Risiken
	Einbeziehung von Wechselwirkungen
	Generische Modellierung von Energieeffizienzmaßnahmen
Risiko- bewertung	Qualitative und quantitative Risikobewertung möglich
	Wechselwirkungen der Risiken bewertbar

---

Abbildung 29: Strukturierung der Anforderungen an das Entscheidungsmodell für die optimierte Auswahl von Energieeffizienzmaßnahmen in der Fabrik

# 5. Entwicklung des Entscheidungsmodells

Aufbauend auf den in den vorherigen Kapiteln beschriebenen Grundlagen, dem gesichteten Stand der Technik und der Wissenschaft sowie den Anforderungen erfolgt nachfolgend die Entwicklung eines Entscheidungsmodells für die Bestimmung optimaler Investitionsprogramme für Energieeffizienzmaßnahmen in der Fabrik. Hierfür wird zunächst das systematische Vorgehen präzisiert und anschließend die einzelnen Aspekte des Entscheidungsmodells vorgestellt.

## 5.1. Methodisches Vorgehen

Grundlage des Vorgehens für die Bestimmung optimaler Investitionsprogramme von Energieeffizienzmaßnahmen in der Fabrik ist das in Kapitel 2.3.1 präsentierte Phasenmodell für die Durchführung eines idealen Entscheidungsprozess nach Göbel (2014).

Vor dem Hintergrund der Problemstellung wurde das Phasenmodell weiter ergänzt und in der Reihenfolge geändert. Der Entwicklung eines Entscheidungsmodells für die Bestimmung optimaler Investitionsprogramme für Energieeffizienzmaßnahmen in der Fabrik voraus geht die Entwicklung eines Bewertungsmodells für Energieeffizienzmaßnahmen. Aufgrund dessen wurde die Entwicklung des Bewertungsmodells als eigener Schritt in das systematische Vorgehen aufgenommen.

Zudem ist die Festlegung von relevanten Nebenbedingungen ebenfalls als eigener Schritt in das Vorgehen aufgenommen worden, obwohl diese im Vorgehen nach Göbel bereits innerhalb der Problemformulierung bestimmt werden. Grund hierfür ist, dass die Ableitung von relevanten Nebenbedingungen entscheidend vom Bewertungssystem auf der einen und dem Zielsystem auf der anderen Seite beeinflusst wird. Da diese zu Beginn der Problemformulierung noch nicht präzisiert sind, erfolgt die Ableitung der relevanten Nebenbedingungen erst in einem späteren Schritt.

Das systematische Vorgehen bei der Entwicklung des Entscheidungsmodells gliedert sich demnach in folgende Teilschritte:

- Problemformulierung, insbesondere Klassifizierung des Entscheidungsmodells.
- Entwicklung eines Zielsystems, inklusive dessen Zieldimensionen.
- Entwicklung eines Bewertungsmodells für Energieeffizienzmaßnahmen.
- Auswahl relevanter Nebenbedingungen für die Eingrenzung des Lösungsraums.
- Ableitung von Entscheidungsregeln für die optimale Auswahl von Energieeffizienzmaßnahmen in der Fabrik.

Zunächst erfolgt die Formulierung des Entscheidungsproblems. Diese beinhaltet die Klassifizierung des Entscheidungsmodells sowie eine mathematische Formulierung des Problems einschließlich des Aktions- und Zustandsraums. Nachfolgend erfolgt die Ableitung eines Zielsystems für das Entscheidungsmodell, mit dessen Hilfe Investitionsprogramme an Zielen gemessen und bewertet werden. Hierbei wird ein hierarchisches, mehrstufiges Zielsystem entwickelt, welches die individuellen Gewichtungen der Entscheidungsträger berücksichtigt. Darauf folgend wird ein Bewertungsmodell für Energieeffizienzmaßnahmen entwickelt. Dieses dient dazu, relevante Informationen für die Bewertung der Zielkriterien abzubilden, die bei der Bewertung der Maßnahmen einbezogen werden müssen. Besondere Beachtung findet die Einbeziehung von Risiken durch die Entwicklung einer Risikobewertungsmethode. Anschließend werden relevante Nebenbedingungen des Entscheidungsmodells identifiziert. Diese dienen der Eingrenzung des Lösungsraums auf Basis der relevanten Restriktionen des Entscheiders, etwa in Form von maximalen Investitionsbudgets und minimalen Energieeinsparungen. Den Abschluss des eigentlichen Entscheidungsmodells bildet die Ableitung von Entscheidungsregeln in Form eines Optimierungsproblems. Dies erfolgt durch Auswahl eines geeigneten Lösungsalgorithmus.

Basierend auf der Lösungsfindung erfolgt eine Entscheidungsanalyse im Rahmen einer Monte-Carlo-Simulation. Mit dieser wird das Verhalten des Investitionsprogramms in unterschiedlichen Szenarien untersucht. Abschließend erfolgt die Aufbereitung der

erzielten Ergebnisse in Form von Entscheidungsdarstellungen. Das zuvor beschriebene Vorgehen ist in Abbildung 30 zusammengefasst.

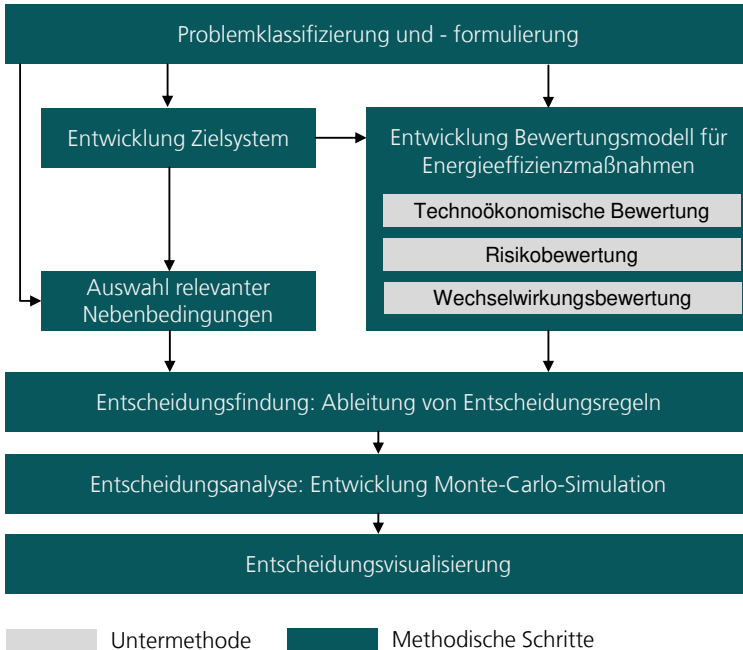


Abbildung 30: Methodisches Vorgehen

Durch Ausgestaltung der einzelnen Schritte des Phasenmodells wird die vierte Teilforschungsfrage beantwortet: Wie kann ein Entscheidungsmodell für die Bestimmung optimaler Investitionsprogramme konzipiert werden?

## 5.2. Problemklassifizierung und -formulierung

In den nächsten beiden Kapiteln wird zunächst aufbauend auf den vorgestellten Grundlagen das der Zielsetzung zugrunde liegende Entscheidungsmodell klassifiziert und mathematisch formuliert.

### 5.2.1. Problemklassifizierung

Nachfolgend erfolgt zunächst eine entscheidungstheoretische Einordnung aufgrund der Vielzahl an in Kapitel 2.3.3 vorgestellten Eigenschaften von Entscheidungsmodellen. Diese basiert neben der Problemstellung (Kapitel 1.2) auf den Grundlagen (Kapitel 2) sowie den abgeleiteten Anforderungen (Kapitel 4.2).

Die dem Entscheidungsmodell zugrunde liegende Problemstellung ist die Investitionsprogrammplanung von Energieeffizienzmaßnahmen in der Fabrik, also der simultanen Entscheidung eines Entscheidungsträgers über die Durchführung von mehr als einer Energieeffizienzmaßnahme. Ein mithilfe des Entscheidungsmodells ermitteltes Investitionsprogramm stellt die Entscheidung über Durchführung bzw. Nichtdurchführung einer Anzahl von Energieeffizienzmaßnahmen dar. Im Sinne der Klassifizierung der Investitionsbewertung in Kapitel 2.2.3 handelt es sich demnach grundlegend um ein **Modell zur Bestimmung des optimalen Investitionsprogramms bei vorgegebenem Kapitalbudget und Produktionsprogramm**. Grundannahmen des Modells lauten (Götze 2014, S. 312):

- Vorhandene Investitionsobjekte schließen sich nicht gegenseitig aus.
- Finanzielle Mittel können nicht unbegrenzt zum Kalkulationszins aufgenommen werden.
- Investitionen können unabhängig voneinander durchgeführt werden.
- Es handelt sich um eine Entscheidung unter Sicherheit.
- Das Investitionsprogramm ist für den Beginn des Planungszeitraums zu bestimmen.

Die Motivation für die simultane Entscheidung in Form von Investitionsprogrammen ist durch verschiedene Eigenschaften der Energieeffizienzmaßnahmen begründet: Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Energieeffizienzmaßnahmen können deren Wirkungseffekte abschwächen oder verstärken. Darüber hinaus findet die Entscheidung über die Durchführung immer unter begrenzt verfügbaren Investitionsbudgets statt, durch die reine Einzelentscheidungen nicht adäquat sind. Vor diesem Hintergrund wird

von einer **simultanen Entscheidung in Form eines Investitionsprogramms** ausgegangen.

Energieeffizienzmaßnahmen können nicht unter einem rein monetären Gesichtspunkt ausgewählt werden, sondern es müssen weitere Zielkriterien berücksichtigt werden, etwa hinsichtlich der Energieeinsparung, Risiken und Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Maßnahmen. Demnach handelt es sich um ein **multikriterielles Entscheidungsproblem**.

Angelehnt an die in Kapitel 2.3.3 vorgestellten Klassifikationen handelt es sich um eine **Entscheidung unter Sicherheit**. Im Sinne des Modellverständnisses wird aufgrund der grundsätzlichen Berechenbarkeit von Wirtschaftlichkeit und Energieeinsparung von einer Entscheidung unter Sicherheit ausgegangen. Diese stellt jedoch keine binäre Entscheidung gegen eine Entscheidung unter Unsicherheit dar. So sind sowohl Wirtschaftlichkeit als auch erzielte Energieeinsparungen im Einzelnen trotz ihrer grundsätzlichen Berechenbarkeit mit Unsicherheiten verbunden. Dem wird durch eine Einbeziehung von Risiken als weiteres Bewertungskriterium sowie der an die Ergebnisfindung angeschlossenen Monte-Carlo-Simulation Rechnung getragen. Die Wahl für eine Entscheidung unter Sicherheit wird demnach unter dem Bewusstsein und der Anerkennung von bestehenden Unsicherheiten getroffen. In Abwägung der Argumente fällt die Wahl unter obenstehender Begründung für eine Entscheidung unter Sicherheit, wobei diese mithilfe der Monte-Carlo-Simulation dennoch Aspekte der Unsicherheit berücksichtigen soll.

Eine weitere wichtige Eigenschaft des Entscheidungsmodells bezieht sich auf die Anzahl der Entscheidungsträger. Hier liegt der Fokus auf der Entscheidung **eines einzelnen Entscheiders**. Die Begründung hierfür lässt sich aus dem Ziel der Entscheidungsunterstützung ableiten. Die Entscheidung soll auf Basis der aus dem Entscheidungsmodell ermittelten Ergebnisse getroffen werden, die Entscheidung in letzter Instanz jedoch noch immer bei dem oder den Entscheidungsträgern liegen. Auf eine explizite Berücksichtigung von Gruppenentscheidungen wird jedoch verzichtet. Bei der Ermittlung der Zielgewichtung wird durch Nutzung des analytischen

Hierarchieprozesses (AHP) jedoch zudem bereits die Grundlage für Gruppenentscheidung gelegt.

Letzte Eigenschaft des Modells bezieht sich auf die Unterscheidung zwischen ein- und mehrperiodigen Entscheidungen. Angelehnt an den in DIN 16247 vorgestellten Entscheidungsprozess wird von einer **einperiodigen Entscheidung** ausgegangen und auf eine mehrperiodige Entscheidung verzichtet. Grundsätzlich sind sowohl ein- als auch mehrperiodige Entscheidungsmodelle für die optimierte Auswahl von Energieeffizienzmaßnahmen in der Fabrik denkbar. Bei der Betrachtung von mehrperiodigen Entscheidungen ist jedoch zu berücksichtigen, dass neue Energieeffizienzmaßnahmen in den Perioden  $t + 1$  vorhanden sein können, wodurch der Aktionsraum dynamisch beeinflusst wird. In der vorliegenden Arbeit wird die Wahl getroffen, zunächst ein einperiodiges Entscheidungsmodell zu entwickeln, wobei eine Weiterentwicklung hin zu einer mehrperiodigen (stochastischen) Entscheidung im Ausblick als weiterer Forschungsbedarf zu nennen ist.

Durch die zuvor vorgestellten Eigenschaften ergibt sich die in Tabelle 8 zusammengefasste Klassifikation des Entscheidungsmodells. In diesem ist die getroffene Auswahl fett markiert.

Tabelle 8: Klassifizierung des Entscheidungsmodells

Anzahl der Ziele	Ein Ziel	<b>Mehrere Ziele</b>		
Kenntnis über Umweltzustand	<b>Sicherheit</b>	Unsicherheit		
		Ungewissheit	Risiko	Unschärfe
Planungshorizont	<b>Einstufig</b>	Mehrstufig		
Anzahl Entscheidungs-träger	<b>Einzelentscheidung</b>	Gruppenentscheidung		

### 5.2.2. Problemformulierung

Im Folgenden wird das zuvor verbal beschriebene Entscheidungsmodell in einer mathematischen Form modelliert. Die einzelnen Aspekte des Entscheidungsmodells, namentlich das Ziel- und Bewertungssystem, werden zunächst nur abstrakt betrachtet und in nachfolgenden Kapiteln präzisiert.

Die grundlegende Ermittlung eines optimalen Investitionsprogramms für Energieeffizienzmaßnahmen in der Fabrik reduziert sich auf eine Reihe von simultanen Einzelentscheidungen, ob eine Energieeffizienzmaßnahme durchgeführt wird.  $M$  repräsentiert die Menge der betrachteten Energieeffizienzmaßnahmen. Für alle Energieeffizienzmaßnahmen  $m_i \in M$  muss entschieden werden:

$$m_i = \begin{cases} 1, & \text{Energieeffizienzmaßnahme } i \text{ durchführen} \\ 0, & \text{Energieeffizienzmaßnahme } i \text{ nicht durchführen} \end{cases} \quad (5.1)$$

Eine beliebige Handlungsalternative des Entscheidungsproblems besteht aus einem Tupel, wobei  $n$  die Anzahl der verfügbaren Energieeffizienzmaßnahmen ausdrückt:

$$A = \{m_1, m_2, m_i, \dots, m_n\} \quad \text{mit } m_i \in \{0,1\} \text{ und } i = 1 \dots n \quad (5.2)$$

Die Durchführung einer Energieeffizienzmaßnahme  $m_i$  ist mit einem Ergebnis verbunden, welches in einem Vektor der betrachteten Zielausprägungen dargestellt ist:

$$d_i = (d_{i1}, d_{i2}, \dots, d_{iN_z}) \quad (5.3)$$

Dabei bezeichnet  $d_{iz}$  den Wert der Zielgrößen ( $z = 1, 2, \dots, N_z$ ) bei der Wahl der Alternative  $m_i$  und  $i = 1, 2, \dots, n$ .

Das Optimierungsproblem ergibt sich aus der Ermittlung der Handlungsalternative, welche die Summe der Ergebnisausprägungen der Zielgrößen unter Einbeziehung von weiteren Wechselwirkungen sowie unter weiteren Nebenbedingungen in Form der Gleichungen  $h_u(A)$  und  $g_v(A)$  maximiert.

Unter Berücksichtigung der zuvor vorgestellten Ergebnisse ergibt sich folgendes Optimierungsproblem:



$$\max_A \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{N_Z} d_{ij} m_i \quad (5.4)$$

$$u. d. N \begin{cases} h_u(A) = 0, u \in \{1, \dots, n\} \\ g_v(A) \leq 0, v \in \{1, \dots, n\} \end{cases}$$

$$A = \{m_1, m_2, m_i, \dots, m_n\} \quad \text{mit } m_i \in \{0,1\} \text{ und } i = 1 \dots n, \quad j = 1 \dots N_Z$$

Beim vorliegenden Problem handelt es sich um ein ganzzahliges Optimierungsproblem, wobei die Ganzzahligkeitsbedingung in der binären Entscheidung zwischen Durchführung und Nichtdurchführung begründet liegt.

Die Anwendung setzt die weitere Präzisierung der zuvor präsentierten Bestandteile des Optimierungsproblems sowie des Bewertungssystems für Energieeffizienzmaßnahmen voraus.

Abbildung 31 fasst das entstehende Entscheidungsmodell auf einer hohen Abstraktionsebene zusammen. Ziel der nachfolgenden Kapitel ist die Ausgestaltung der notwendigen Methoden für die Instanziierung des Entscheidungsmodells.

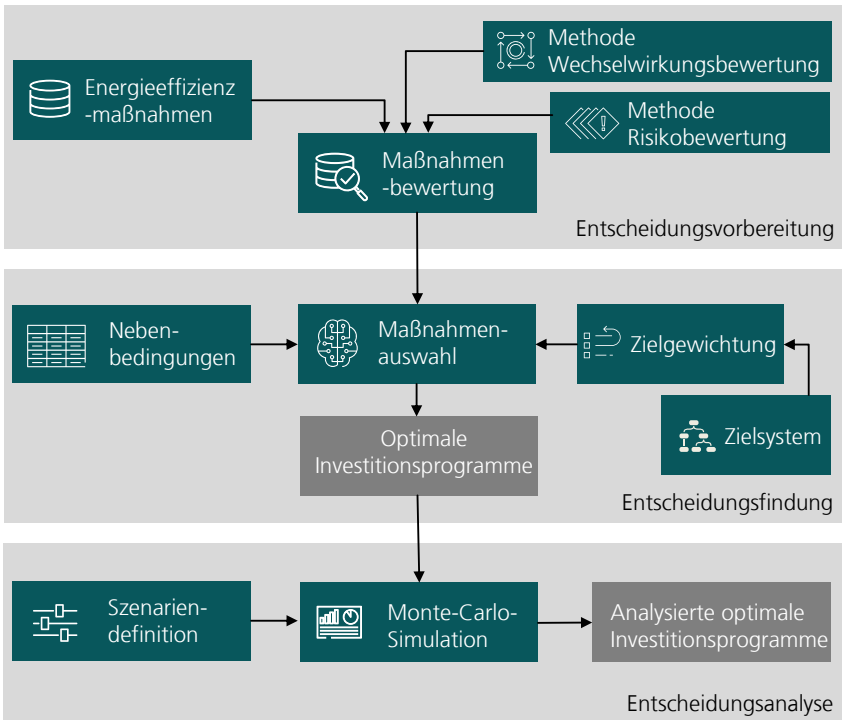


Abbildung 31: Entscheidungsmodell für die Bestimmung optimaler Investitionsprogramme für Energieeffizienzmaßnahmen in der Fabrik

### 5.3. Entwicklung des Zielsystems und Bestimmung der Zielgewichte

Im Weiteren wird zunächst ein Zielsystem für die Auswahl von Energieeffizienzmaßnahmen vorgestellt. Ziel ist es die für den Entscheider relevanten Zieldimensionen zu erarbeiten und diese mit nachgelagerten Zielkriterien zu verknüpfen. Die Bewertung der Energieeffizienzmaßnahmen ist hierbei übereinstimmend mit dem Zielsystem des Entscheiders bei der Bewertung von Investitionsprogrammen. Anschließend wird eine Methode für die Ermittlung der individuell durch den Entscheider festgelegten Gewichtungsfaktoren präsentiert.

### 5.3.1. Entwicklung des Zielsystems

Ein Zielsystem für ein Entscheidungsmodell zur optimalen Auswahl von Energieeffizienzmaßnahmen in der Fabrik muss sich grundlegend in den Zielen der Fabrik verorten lassen, wie sie in Kapitel 2.1.2 vorgestellt wurden. Wie gezeigt wurde bieten diese letztlich jedoch nur einen groben Rahmen, der noch nicht präzise genug ist, um als eigenständiges Zielsystem für die Auswahl von Energieeffizienzmaßnahmen zu fungieren.

Für eine Präzisierung kann auf die vorgestellten Untersuchungen von Cooremans (2012) zu Entscheidungsprozessen in der Energieeffizienz zurückgegriffen werden. Als strategische Dimensionen von Energieeffizienzmaßnahmen wurden Nutzen, Kosten und Risiken identifiziert, die letztlich ein Zielsystem auf der höchsten Stufe konstituieren. Die Ergebnisse von Cooremans (2012) verdeutlichen zudem die Bedeutung einer individuellen Zielgewichtung, da die einzelnen Dimensionen von Entscheidern unterschiedlich schwer gewichtet werden.

Aufbauend auf den strategischen Zieldimensionen folgt deren Präzisierung in Form von einzelnen Zielkriterien. Angelehnt an diese wird ein Zielsystem für die Auswahl von Energieeffizienzmaßnahmen entwickelt, bei dem der Entscheider die Gewichtungen der einzelnen Zieldimensionen und den nachgelagerten Zielkriterien bestimmt.

Die von Cooremans als Nutzen bezeichnete Zieldimension wird nachfolgend aufgrund der Überschneidung mit der entscheidungstheoretischen Nutzenfunktion, angelehnt an das in Kapitel 3.2.1 vorgestellte Bewertungssystem von Dehning, in **ökologische Zieldimension** umbenannt. Als Zielkriterium wird primär die jährliche Energieeinsparung der Energieeffizienzmaßnahmen betrachtet. Vom Entscheider können zudem ergänzend die vermiedenen CO<sub>2</sub>-Emissionen als weiteres Zielkriterium einbezogen werden.

Die Zieldimension Kosten wird Bezug nehmend auf die in Kapitel 2.2.3 dargestellten Verfahren der Investitionsbewertung und -rechnung zunächst als **ökonomische Zieldimension** bezeichnet. Grund hierfür liegt in der Verwendung des Kapitalwerts als Zielkriterium, welches sinngemäß nicht mit Kosten übereinstimmt. Die Motivation für die Verwendung des Kapitalwerts wurde in Kapitel 2.2.4 begründet. Demnach wird die

Kapitalwertmethode für die ökonomische Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen empfohlen.

Für die Zieldimension der Risiken wird neben diesen zusätzlich der Umsetzungsaufwand der Energieeffizienzmaßnahmen als Zielkriterium einbezogen. Aufgrund dieser Erweiterung wird von **umsetzungsbezogener Zieldimension** gesprochen. Wie noch zu zeigen, unterscheiden sich die als relevant eingestufteten Risiken bei der Umsetzung von Energieeffizienzmaßnahmen stark je nach befragtem Unternehmen. In Kapitel 5.4.4 wird deshalb eine Methode für die unternehmensspezifische Risikobewertung vorgestellt. Weitere mögliche Zielkriterien ergeben sich aus den sogenannten nichtenergetischen Vorteile der Energieeffizienz. Diese können ebenfalls bei der umsetzungsbezogenen Zieldimension einbezogen werden, besitzen jedoch im Falle einer möglichen Monetarisierung eine Verknüpfung zur ökonomischen Zieldimension.

Das entstehende Zielsystem ist mit den zu berücksichtigenden **Wechselwirkungen** in Abbildung 32 dargestellt. Eine Methode für die Bewertung von Wechselwirkungen wird in Kapitel 5.4.2 vorgestellt. Ersichtlich sind ebenfalls die Gewichtungsfaktoren der einzelnen Stufen, welche vom Entscheider individuell festgelegt werden.

Hervorzuheben ist, dass es sich um *ein* relevantes Zielsystem handelt, welches die zuvor abgeleiteten Anforderungen erfüllt. Denkbar sind weitere Zielkriterien, welche von individuellen Entscheidern bei der Auswahl von Energieeffizienzmaßnahmen einbezogen werden sollen. Um dem Rechnung zu tragen, wird dem jeweiligen Entscheider die Möglichkeit gegeben, weitere Zielkriterien einzubeziehen.

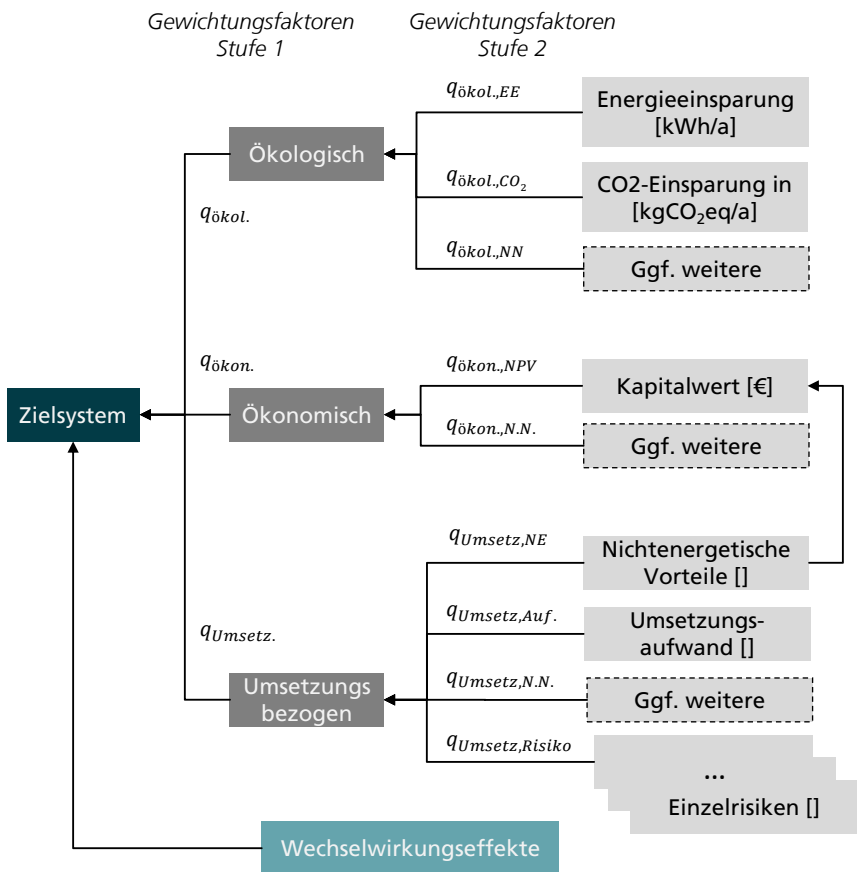


Abbildung 32: Zielsystem für Investitionsprogramme von Energieeffizienzmaßnahmen

### 5.3.2. Bestimmung der Zielgewichte

Aufgrund der in Kapitel 2.3.5 beschriebenen Problematik einer direkt durch den Entscheider festgelegten Gewichtung der Ziele, die in der Regel nicht dessen Präferenzen abbildet, wird für die Ermittlung der Gewichte ein analytisch-hierarchischer Prozess (AHP) durchgeführt. Vorteil ist neben einer besseren Erfassung der Präferenzen eine einfache Erweiterung zu einer Gruppenentscheidung, also die Festlegung der Zielgewichte durch mehr als einen Entscheider mithilfe des geometrischen Mittels.

Für die Ermittlung der Zielgewichtung wird der Entscheider gebeten, diese mithilfe der Neun-Punkte-Skala nach Saaty zu bewerten, die in Tabelle 9 ersichtlich ist.

Tabelle 9: Neun-Punkte-Skala von Saaty (Götze 2014, S. 203; Mühlbacher et al. 2013, S. 122)

Skalenwert	Definition	Interpretation
1	Gleiche Bedeutung	Beide verglichenen Elemente haben die gleiche Bedeutung für das nächsthöhere Element.
3	Etwas größere Bedeutung	Erfahrung und Einschätzung sprechen für eine etwas größere Bedeutung eines Elements im Vergleich zu einem anderen.
5	Erheblich größere Bedeutung	Erfahrung und Einschätzung sprechen für eine erheblich größere Bedeutung eines Elements im Vergleich zu einem anderen.
7	Sehr viel größere Bedeutung	Die sehr viel größere Bedeutung eines Elements hat sich in der Vergangenheit klar gezeigt.
9	Absolut dominierend	Es handelt sich um den größtmöglichen Bedeutungsunterschied zwischen zwei Elementen.

---

2, 4, 6, 8      Zwischenwerte      Feinabstufung

---

Für die erste Stufe des Zielsystems ergibt sich die in Tabelle 10 durch den Entscheider auszufüllende Matrix.

Tabelle 10: Zieltabelle

---

	Ökologische Ziele	Ökonomische Ziele	Umsetzungsbezogene Ziele
Ökologische Ziele	1	$v_{12}$	$v_{13}$
Ökonomische Ziele	$v_{21}$	1	$v_{23}$
Umsetzungsbezogene Ziele	$v_{31}$	$v_{32}$	1

---

In Tabelle 11 ist eine exemplarische Zieltabelle dargestellt. Deren Interpretation ist, dass der Entscheider ökologischen Zielen eine erheblich größere Bedeutung (5) zuweist. Zudem wird den umsetzungsbezogenen Zielen eine etwas größere Bedeutung (3) als den ökologischen Zielen zugewiesen. Umsetzungsbezogenen Zielen wird zudem eine sehr viele größere Bedeutung (7) als den ökonomischen Zielen zugewiesen. In diesem Fall wurde den umgedrehten Fragestellungen zudem eine inverse Gewichtung der Form  $1/i$  zugeteilt.

Tabelle 11: Exemplarische Zieltabelle

---

	Ökologische Ziele	Ökonomische Ziele	Umsetzungsbezogene Ziele
Ökologische Ziele	1	5	1/3
Ökonomische Ziele	1/5	1	1/7
Umsetzungsbezogene Ziele	3	7	1

---

Mithilfe der in Kapitel 2.3.5 vorgestellten Lösung des Eigenwertproblems erfolgt die Ermittlung des Gewichtungsvektors  $w$ :

$$Aw = \lambda \cdot w \quad (5.5)$$

Dabei ist  $w$  der Eigenvektor und  $\lambda$  der Eigenwert. Es wird nun der Eigenwert  $\lambda_{max}$  bestimmt, der im Fall einer vollständigen Konsistenz der Paarvergleiche  $n$  ergibt. Die entstehende Prioritätsgewichtung zur exemplarischen Zieltabelle ist nachfolgend in Tabelle 12 ersichtlich.

Tabelle 12: Prioritätsgewichtung

Zielkriterium	Prioritätsgewichtung
Ökologische Ziele	0,279
Ökonomische Ziele	0,0719
Umsetzungsbezogene Ziele	0,6491
Summe	1
Konsistenzverhältnis (CR)	0,0624

Aufgrund des Konsistenzverhältnisses, das mit  $0,0624 < 0,1$  als gut angesehen wird, handelt es sich bei dem gewählten Beispiel um eine konsistente Bewertung.

Das gleiche Vorgehen wird auf der zweiten Stufe des Zielsystems durchgeführt, um die (Unter-)Gewichtung der ökologischen Zielkriterien zu ermitteln. Deren absolute Gewichtung ergibt entsprechend durch Multiplikation mit der Gewichtung der zuvor ermittelten Gewichtung die ökologischen Ziele.

In Summe ergibt sich so ein hierarchisches Zielsystem, dessen Gewichtungsfaktoren mithilfe des AHPs ermittelt und auf Konsistenz geprüft werden.

Für die Unterstützung des Entscheiders bei der Festlegung der Gewichtungsfaktoren werden im weiteren Verlauf zudem exemplarische Entscheidermodellierungen entwickelt, welche als Orientierungshilfe bei dem Metaproblem der Festlegung der Gewichtungsfaktoren dienen.



#### 5.4. Bewertungsmodell für Energieeffizienzmaßnahmen

Das Bewertungsmodell umfasst die für die Berechnung der Zielkriterien notwendigen Bewertungskriterien der Energieeffizienzmaßnahmen und baut direkt auf dem zuvor entwickelten Zielsystem auf. Neben den verschiedenen Bewertungskriterien werden insbesondere die einzelnen Methoden zur Risiko- und Wechselwirkungsbewertung vorgestellt.

Es wird innerhalb des Bewertungsmodells unterschieden zwischen Bewertungskriterien, die zwingend notwendig für das Entscheidungsmodell sind, sowie optionalen Bewertungskriterien, deren Einbeziehung für bestimmte Anwendungsfälle möglich ist, die jedoch nicht für die Durchführung des Entscheidungsmodells zwingend notwendig sind.

##### 5.4.1. Ökonomische und ökologische Bewertung

Wie in Kapitel 2.2.4 erläutert, wird für die **ökonomische Bewertung** von Energieeffizienzmaßnahmen die Verwendung von dynamischen Verfahren, insbesondere der Kapitalwertmethode, empfohlen. Wie hervorgehoben wurde, sind laut Nissen 2018, S. 5 die monetären Einsparungen der Energiekosten als Zahlungsströme bei der Kapitalwertmethode zu werten, die tendenziell durch Energiepreissteigerungen ansteigen. Für die Berechnung des Kapitalwerts ergibt sich folgende Formel:

$$\text{Kapitalwert} = \sum_{t=0}^T (e_t - a_t) q^{-t} \quad (5.6)$$

$a_t$  = Höhe der laufenden Auszahlungen der Periode  $t$

$e_t$  = Höhe der laufenden Einzahlungen der Periode  $t$

$T$  = die Länge der Nutzungsdauer

$q$  = Abzinsungsfaktor

Für die Berechnung des Kapitalwerts ist die **Nutzungsdauer** der Energieeffizienzmaßnahmen zu berücksichtigen. Hinweise für deren Festlegung wurden in Kapitel 2.2.4 vorgestellt. Die Höhe des **Kalkulationszinses** ist kein maßnahmenpezifisches Bewertungskriterium, wird jedoch als

maßnahmenübergreifender Parameter in die Bewertung einbezogen, der vom Entscheider festgelegt wird.

Die **ökologische Bewertung** der Energieeffizienzmaßnahmen ist angelehnt an die in Kapitel 3.2.1 vorgestellte Bewertung von Dehning. Während dieser bei der ökologischen Betrachtung das Einsparpotenzial der Energie in Prozent berechnet, wird in Bezug auf eine bessere Aggregation auf Ebene der Maßnahmenbündel die **eingesparte absolute Energiemenge pro Jahr** als Maß für das Einsparpotenzial der Energie betrachtet. Die optional einzubeziehende CO<sub>2</sub>-Einsparung wird in **Äquivalenten vermiedener Tonnen CO<sub>2</sub> pro Jahr** betrachtet.

#### 5.4.2. Wechselwirkungsbewertung

Für die im Rahmen von DIN 16247 geforderte Berücksichtigung von Wechselwirkungen zwischen Energieeffizienzmaßnahmen wird ein Vorgehen gewählt, bei dem sowohl eine qualitative als auch eine quantitative Bewertung für den Entscheidenden möglich ist. Wie von Haag (2013) hervorgehoben, ist die Wechselwirkungsbewertung immer anwendungsspezifisch und demnach mit einem hohen Aufwand verbunden. Für die Anwendbarkeit auch auf sehr große Menge an Energieeffizienzmaßnahmen steht in diesem Zuge ergänzend eine qualitative Methode zur Verfügung, die auf den Vorarbeiten von Dehning basiert, dessen Dissertation in Kapitel 3.2.1 vorgestellt wurde. Ebenso steht jedoch ein quantitatives Vorgehen zur Verfügung, mit dessen Hilfe Wechselwirkungseffekte in den einzelnen Zielkriterien einbezogen werden können. Nachfolgend werden die in Abbildung 33 zusammengefassten Vorgehen vorgestellt.

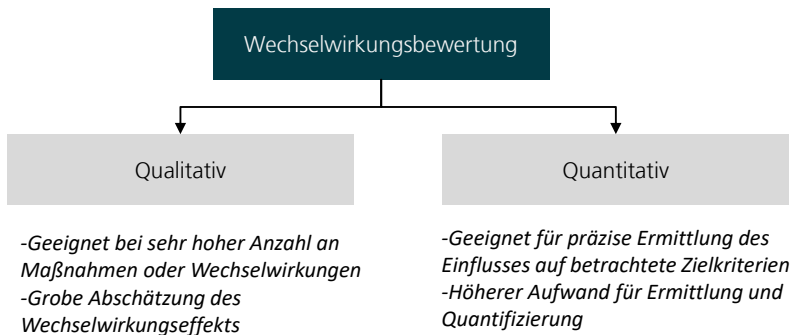


Abbildung 33: Vorgehen Wechselwirkungsbewertung

### **Qualitative Wechselwirkungsbewertung**

Grundzüge des Verfahrens sind die Abbildung der Wechselwirkungen innerhalb einer Wechselwirkungsmatrix. In dieser werden für die betrachteten Energieeffizienzmaßnahmen mögliche Wechselwirkungseffekte qualitativ erfasst und abgebildet. Durch Auswertung der Zeilen- und Spaltensummen können sich hierdurch die Wechselwirkungseffekte der Maßnahmen bestimmen lassen.

Die Wechselwirkungen werden in sieben unterschiedlichen Ausprägungen zwischen einer stark abschwächenden bis zu einer stark verstärkenden Wirkung bewertet. Es wird folgende Skala verwendet:

- +3: stark verstärkende Wirkung
- +2: verstärkende Wirkung
- +1: schwach verstärkende Wirkung
- 0: kein direkter Einfluss
- -1: schwach abschwächende Wirkung
- -2: abschwächende Wirkung
- -3: stark abschwächende Wirkung

Die Aktivsumme genannte Zeilensumme bezeichnet den Aktivitätsgrad einer Maßnahme und beschreibt deren Auswirkungen auf andere Maßnahmen. Spaltensummen werden als Passivsumme bezeichnet und beschreiben die Einwirkungen anderer Maßnahmen auf die betrachtete Maßnahme. Eine exemplarische Wechselwirkungsmatrix ist in Tabelle 13 ersichtlich.

Tabelle 13: Exemplarische Wechselwirkungsmatrix angelehnt an Dehning (2017)

	$m_1$	$m_2$	$m_3$	$m_4$	$m_5$	$AS_i$
$m_1$		0	-1	0	0	-1
$m_2$	0		3	-1	0	2
$m_3$	1	0		-1	0	0
$m_4$	0	1	0		2	3
$m_5$	-2	0	1	0		-1
$PS_i$	-1	1	3	-2	2	3

In die Gesamtbewertung fließen Wechselwirkungen über nachfolgende Berechnung ein:

$$U_{Wechselwirkung}(x_a) = \sum_{m=1}^n AS_i * q_{Wechselwirkungen} \quad (5.7)$$

Der Parameter  $q_{Wechselwirkungen}$  stellt einen individuell festlegbaren Gewichtungsfaktor für die Einbeziehung der Wechselwirkungen dar. Motivation ist die qualitative Erfassung der Wechselwirkungen, durch die eine direkte Übernahme der Aktivsummen nicht zielführend ist. Um zu berücksichtigen, dass entweder die Maßnahmenkombination oder aber einzelne Energieeffizienzmaßnahmen durchgeführt werden können, werden in einem darauffolgenden Schritt Nebenbedingungen gebildet, um dies zu berücksichtigen. Der Fall einer gemeinsamen Umsetzung wird durch eine aggregierte virtuelle Maßnahme umgesetzt:

$$m_v = m_i \cup m_j = \begin{cases} 1, & \text{Maßnahmen } i \text{ und } j \text{ gemeinsam durchführen} \\ 0, & \text{Maßnahmen } i \text{ und } j \text{ nicht gemeinsam durchführen} \end{cases} \quad (5.8)$$

Durch die Formulierung von Nebenbedingungen wird modelliert, dass nur eine Einzelmaßnahme oder die gemeinsame virtuelle Maßnahme durchgeführt werden kann. Innerhalb der gewählten Modellierung wird eine Durchführung mit 1 und eine Nichtdurchführung mit 0 codiert. Im Fall der zuvor betrachteten Maßnahmen  $m_i$  und  $m_j$  wird dies folgendermaßen umgesetzt:

$$\begin{aligned} m_v + m_i &\leq 1 \\ m_v + m_j &\leq 1 \end{aligned} \quad (5.9)$$

Vorteil der verwendeten Methode für die Wechselwirkungsbewertung ist eine geringe Komplexität der Durchführung, die mit einer quantitativen Bewertung einhergehen würde. Auf der anderen Seite erfolgt durch den qualitativen Bewertungscharakter lediglich eine grobe Abschätzung der Wechselwirkungen, welche vor allem darauf abzielt, Maßnahmen mit einer positiven oder auch negativen Wechselwirkung zu identifizieren und deren positive oder negative Wechselwirkungen bei der optimierten Maßnahmenauswahl einbeziehen zu können.

Hervorzuheben ist, dass mögliche Weiterentwicklungen, bzw. alternative Bewertungsmethoden, ohne höheren Anpassungsaufwand in das entwickelte Entscheidungsmodell übernommen werden können. Die Entscheidung für eine qualitative Bewertungsmethode geht also nicht mit einer grundsätzlichen Einschränkung auf qualitative Bewertungsmethoden einher.

### **Quantitative Wechselwirkungsbewertung**

Die quantitative Bewertung basiert auf einer mathematischen Ermittlung der Wechselwirkungseffekte auf die betrachteten Zieldimensionen. So können vom Entscheider beispielsweise Wechselwirkungen auf die jährliche Energieeinsparung oder auch den Kapitalwert ermittelt werden. Das Vorgehen für die quantitative Wechselwirkungsbewertung ist in Abbildung 34 dargestellt. Innerhalb des Vorgehens werden zunächst alle betrachteten Energieeffizienzmaßnahmen übergeben und

ausgehend von den drei Zieldimensionen die möglichen wechselseitigen Beeinflussungen ermittelt. Falls keine Wechselwirkungen ermittelt wurden, endet das Vorgehen mit der Übergabe der Energieeffizienzmaßnahmen an den Optimierungsalgorithmus. Im Falle vorhandener Wechselwirkungen erfolgt eine Überführung in die zuvor dargestellten virtuellen Energieeffizienzmaßnahmen für die weitere Anwendung des Optimierungsalgorithmus, welche die ermittelten Wechselwirkungseffekte, etwa auf den Kapitalwert oder die jährliche Energieeinsparung, beinhalten.

Um zu berücksichtigen, dass entweder die Maßnahmenkombination oder aber einzelne Energieeffizienzmaßnahmen durchgeführt werden können, werden analog des qualitativen Vorgehens in einem folgenden Schritt Restriktionen gebildet. Sobald die Restriktionen für alle Wechselwirkungen erstellt wurden, endet das Vorgehen ebenfalls mit der Übergabe der Energieeffizienzmaßnahmen an den Optimierungsalgorithmus.

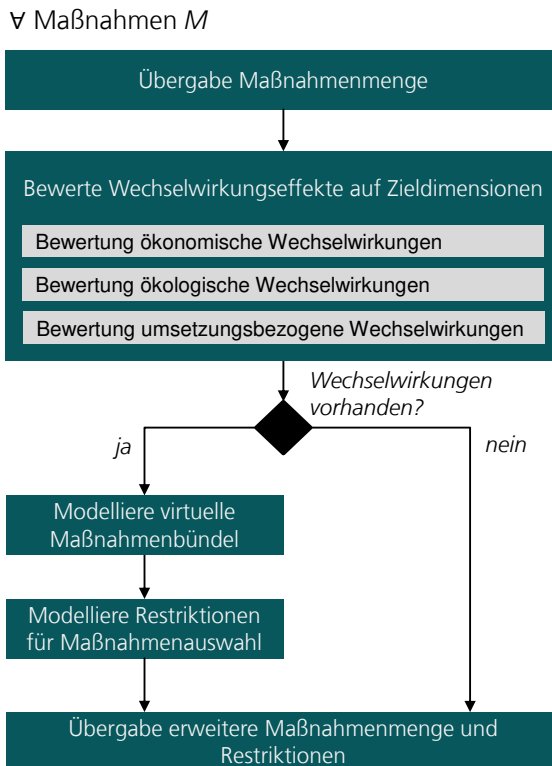


Abbildung 34: Vorgehen quantitative Wechselwirkungsbewertung

### 5.4.3. Bewertung des Umsetzungsaufwands

Bei gleicher ökologischer und ökonomischer Bewertung ist neben dem Risiko der Energieeffizienzmaßnahme zudem der Umsetzungsaufwand als weiteres relevantes Bewertungskriterium zu identifizieren. So können insbesondere verschiedene Kategorien von Energieeffizienzmaßnahmen mit einem unterschiedlich hohen Umsetzungsaufwand verbunden sein.

Die Bewertung des Umsetzungsaufwands erfolgt auf einer fünfstufigen Likert-Skala. Hervorzuheben ist, dass bei einer sehr hohen Anzahl an zu bewertenden

Energieeffizienzmaßnahmen eine Bewertung auf einer höheren Clusterung der Maßnahmen umgesetzt werden kann, etwa auf der Ebene von Energieeffizienzmaßnahmen-Kategorien. In Tabelle 14 ist die Bewertung des Umsetzungsaufwands ersichtlich.

Tabelle 14: Bewertung des Umsetzungsaufwands

---

Umsetzungsaufwand der Energieeffizienzmaßnahme:

- Sehr gering
  - Gering
  - Mittel
  - Hoch
  - Sehr hoch
- 

Jeder Energieeffizienzmaßnahme wird so ein Wert für den Umsetzungsaufwand zwischen 1 (sehr hoch) und 5 (sehr niedrig) zugeordnet. Bei dem Umsetzungsaufwand handelt es sich um einen dimensionslosen Wert, der auf einer fünfstufigen Likert-Skala festgelegt wird. Ziel ist eine qualitative Ordnung, welche den Umsetzungsaufwand der Energieeffizienzmaßnahmen als weiteres Bewertungskriterium in das Bewertungssystem einfließen lässt.

#### 5.4.4. Risikobewertung

Die Auswertung des Stands der Technik und der Wissenschaft in Bezug auf die Risikobewertung von Energieeffizienzmaßnahmen in Kapitel 3.2.3 zeigte eine bisher geringe Beachtung des Forschungsfeldes. Auf bestehende Methoden für die Risikobewertung von Energieeffizienzmaßnahmen, welche die Anforderungen erfüllt, kann deshalb nicht zurückgegriffen werden. Die nachfolgend einzuführende Methode wurde bereits im Rahmen einer eigenen Veröffentlichung vorgestellt (Schneider et al. 2021).



Ziel der Methode ist es, Energieeffizienzmaßnahmen einen Risikowert zuzuordnen. Dieser soll dem Anwender ermöglichen, Risiken sowohl qualitativ als auch quantitativ zu erfassen, und Wechselwirkungen der Risiken zueinander berücksichtigen, um diese bei der Entscheidung einbeziehen zu können.

### **Auswahl relevanter Risiken**

Eine Abfrage der von Unternehmen als relevant empfundenen Risiken erfolgte mithilfe einer ergänzenden Frage im Rahmen des Energieeffizienz-Index der Industrie im zweiten Halbjahr 2020. In dieser wurden Industrieunternehmen gebeten, eine gegebene Vorauswahl an Risiken nach deren wahrgenommener Schwere zu bewerten. Zudem bestand im gewählten Befragungsdesign die Möglichkeit, weitere Risiken zu nennen, falls die gegebene Vorauswahl nicht ausreichend erschien. Da dies nur in einzelnen Ausnahmen der Fall war, wird grundsätzlich davon ausgegangen, dass die Vorauswahl von den Befragten als sinnvoll erachtet wurde. Folgende Risiken wurden den Befragten mit einer kurzen Erläuterung vorgeschlagen:

- Qualitätsrisiken (Beeinflussung der Qualität des Endproduktes)
- Prozessrisiken (Maßnahmen gefährden Produktionsprozesse)
- Personalrisiken (fehlende Motivation, Qualifikation oder Unterstützung)
- Durchführungsrisiken (Erfolg der Maßnahme ungewiss)
- Wirtschaftliche Risiken (Wirtschaftlichkeit geringer als erwartet)

Aus den Ergebnissen geht der subjektive Charakter der als relevant im Sinne von als hoch bis sehr hoch eingeschätzten Risiken hervor. So unterscheiden sich die jeweils am schwerwiegendsten eingeschätzten Risiken sowohl zwischen Branchen als auch Unternehmensgrößen (vgl. Abbildung 35).

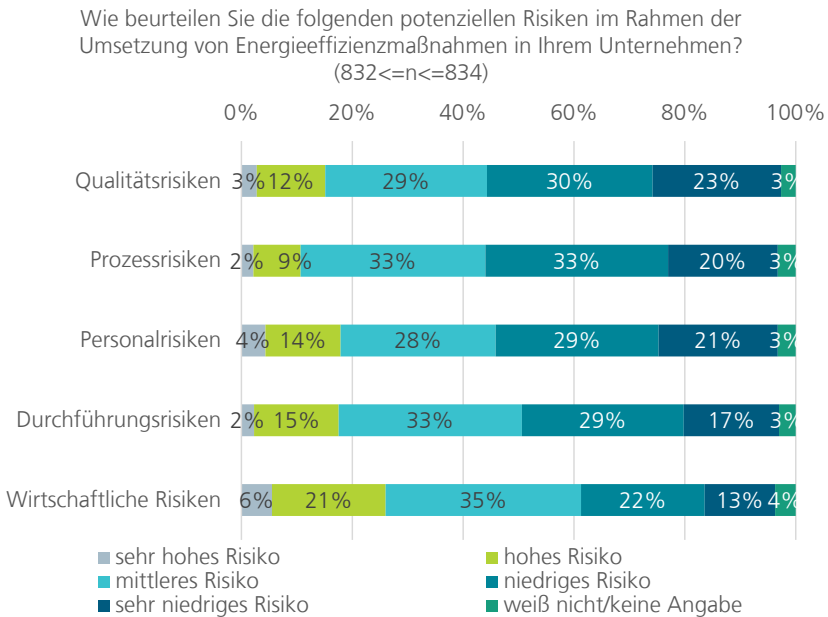


Abbildung 35: Beurteilung von Risiken (EEP 2020)

Aufgrund der individuellen Einschätzung, welche Risiken als relevant gesehen werden, werden in der Methode der Risikobewertung Risiken individuell vom Entscheider ausgewählt, wobei die zuvor genannten Risiken als Vorauswahl zur Verfügung stehen.

Im gewählten Ansatz wird grundlegend zwischen wirtschaftlichen Risiken unterschieden, die mithilfe einer Monte-Carlo-Simulation bewertet werden, sowie weiteren Risiken, welche mithilfe eines Fuzzy-Logik-Ansatzes bewertet werden. Diese Aufteilung nach Risikoarten ist in Abbildung 36 dargestellt.

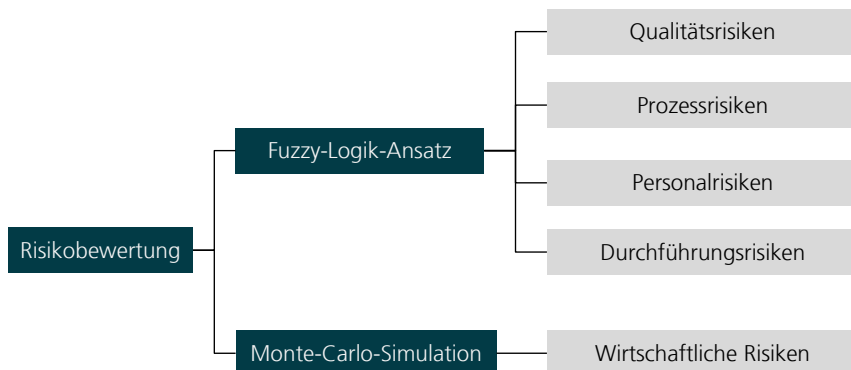


Abbildung 36: Betrachtete Risikoarten

### **Fuzzy-Logik-Risikobewertung**

Grundlagen der nachfolgenden Erläuterungen sind die in Kapitel 2.3.5 vorgestellten Grundlagen der Fuzzy-Logik sowie die in Kapitel 2.5.2 vorgestellten Ansätze zur Fuzzy-Logik-basierten Risikobewertung.

Aufgrund der individuellen Charakterisierung von Energieeffizienzmaßnahmen und der damit verbundenen schwierigen Ermittlung von Eintrittswahrscheinlichkeit und Schadensausmaß wird in der entwickelten Methode zur Risikobewertung von Energieeffizienzmaßnahmen sowohl eine qualitative als auch eine quantitative Bewertung ermöglicht. Um trotz einer fehlenden Quantifizierung eine möglichst gute Einschätzung zu erhalten, können im Zuge der Verwendung eines Fuzzy-Logik-Verfahrens mehrere Experten eine fragebogenbasierte Einschätzung abgeben. Ziel ist es, dadurch Expertenwissen auf breiter Basis zu erfassen, etwa durch Experten des Unternehmens, aber auch für die jeweiligen Energieeffizienzmaßnahmen.

Das Konzept der Fuzzy-Logik-basierten Risikobewertung ist in Abbildung 37 ersichtlich.

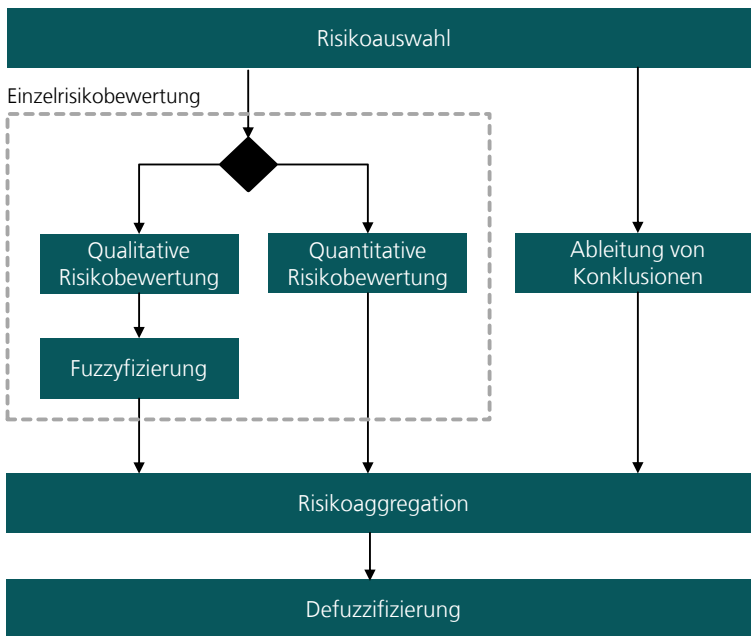


Abbildung 37: Konzept der Risikobewertung

Falls Eintrittswahrscheinlichkeit und Schadensausmaß nicht quantifizierbar sind, kann das Risiko mithilfe eines Fragebogens qualitativ bewertet werden, der in Abbildung 38 dargestellt ist. Hierbei stehen auf einer Likert-Skala Antwortoptionen von „sehr niedrig“ bis „sehr hoch“ zur Verfügung, welche an die Risikomatrix angelehnt sind.

Die Schwere des Qualitätsrisikos ist...	Die Schwere der Personalrisiken ist...
<input type="radio"/> Sehr gering	<input type="radio"/> Sehr gering
<input type="radio"/> Gering	<input type="radio"/> Gering
<input type="radio"/> Mittel	<input type="radio"/> Mittel
<input type="radio"/> Hoch	<input type="radio"/> Hoch
Die Schwere des Prozessrisikos ist...	Die Schwere des Durchführungsrisikos ist...
<input type="radio"/> Sehr gering	<input type="radio"/> Sehr gering
<input type="radio"/> Gering	<input type="radio"/> Gering
<input type="radio"/> Mittel	<input type="radio"/> Mittel
<input type="radio"/> Hoch	<input type="radio"/> Hoch

Abbildung 38: Qualitative Risikobewertung

Das so erfasste Expertenwissen wird arithmetisch gemittelt und über die zuvor betrachteten linguistischen Variablen mithilfe einer Zugehörigkeitsfunktion fuzzifiziert, deren Parameter in Tabelle 15 ersichtlich sind. Wie in Kapitel 2.3.5 erläutert, wird eine s-förmige Zugehörigkeitsfunktion verwendet, in diesem Fall eine verallgemeinerte glockenförmige Zugehörigkeitsfunktion der nachfolgenden Form:

$$f(x, a, b, c) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x - c}{a} \right|^{2b}} \quad (5.10)$$

Nachfolgend wird eine vierwertige, in Tabelle 15 dargestellte, Risikomatrix verwendet.

Tabelle 15: Parameter der Zugehörigkeitsfunktion

Wert	Parameter (a; b; c)
Niedrig	[0,167; 2,5; 0]
Mittel	[0,163; 4,0; 0,329]
Hoch	[0,167; 2,5; 0,667]
Sehr hoch	[0,167; 2,5; 1]

Unter Verwendung der zuvor ersichtlichen Parameter ergibt sich die in Abbildung 39 ersichtliche Zugehörigkeitsfunktion.

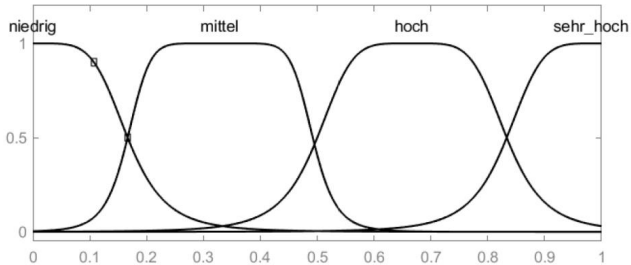


Abbildung 39: Zugehörigkeitsfunktion Fuzzy-Logik

Die Einbeziehung von Wechselwirkungen zwischen Risiken zueinander ist ein entscheidender Faktor bei der Bestimmung eines Risikowerts. Vorteil von Fuzzy-Regelungen ist die Möglichkeit, auf Expertenwissen aufbauende Konklusionen zu verwenden, um hierdurch die gegenseitige Beeinflussung von verschiedenen Einzelrisiken einzubeziehen. Der Ansatz für die Gewinnung von Expertenwissen ist es, Fragebögen für die für die Interferenz notwendigen Wenn/Dann-Regeln zu verwenden und diese in die Fuzzy-Regelung zu implementieren.

Mithilfe der Bewertung der Einzelrisiken und der Bestimmung der Interferenz zwischen den Risiken erfolgt die Ermittlung eines Wertes für das Gesamtrisiko. Tabelle 16 stellt eine exemplarische Konklusion für zwei Risiken vor.

Tabelle 16: Exemplarische Konklusionen für zwei Risikoarten

Prozessrisiko	Durchführungsrisiko	Gesamtrisiko
Gering	Gering	Gering
Gering	Mittel	Gering
Gering	Hoch	Mittel
Gering	Sehr hoch	Mittel
Mittel	Gering	Mittel
Mittel	Mittel	Mittel
Mittel	Hoch	Hoch
Mittel	Sehr hoch	Hoch
Hoch	Gering	Mittel
Hoch	Mittel	Mittel
Hoch	Hoch	Hoch
Hoch	Sehr hoch	Sehr hoch
Sehr hoch	Gering	Hoch
Sehr hoch	Mittel	Hoch
Sehr hoch	Hoch	Hoch
Sehr hoch	Sehr hoch	Sehr hoch

Nachdem Regeln auf die Eingangsvariablen angewandt und eine Ausgangsvariable erstellt wurde, muss diese wieder defuzzifiziert werden. Dies bedeutet, dass der unscharfen Ausgangsvariablen wieder ein eindeutiger Wert zugeordnet werden muss, der den Ausgabewert der Fuzzy-Regelung repräsentiert. Die Berechnungsvorschrift der „Center of Gravity“-Methode für den Ausgabewert sieht folgendermaßen aus:

$$Output = \frac{\sum_{i=1}^n b_i * \int_{-\infty}^{\infty} \mu_i}{\sum_{i=1}^n \mu_i} \quad (5.11)$$

Dabei steht  $\mu_i$  für die jeweilige Zugehörigkeitsfunktion und  $b_i$  für den zugehörigen Flächenschwerpunkt der Zugehörigkeitsfunktion.

Mithilfe der so durchgeführten Defuzzifizierung wird ein Risikowert ermittelt. Die so durchgeführte Risikobewertung von Energieeffizienzmaßnahmen kann in einem weiteren Schritt bei der Auswahl von verschiedenen Energieeffizienzmaßnahmen als ein Bewertungskriterium einbezogen werden.

#### 5.4.5. Bewertung nichtenergetischer Vorteile

Für die optionale Bewertung nichtenergetischer Vorteile wird ein Vorgehen angelehnt an Nehler (2016, S.91) gewählt, bei der zwischen monetarisierbaren und nicht monetarisierbaren nichtenergetischen Vorteilen unterschieden wird. Durch eine Monetarisierung der nichtenergetischen Vorteile ist es möglich, diese bei der Wirtschaftlichkeitsbewertung einzubeziehen. Für diese wurde in Kapitel 5.4.1 die Kapitalwertmethode motiviert und vorgestellt.

Das Vorgehen für die Einbeziehung nichtenergetischer Vorteile sieht sowohl die Möglichkeit einer monetarisierten als auch einer qualitativen Einbeziehung ein. Wenn eine Monetarisierung möglich ist, wird diese durchgeführt und der ermittelte Vorteil an die Berechnung des Kapitalwerts übergeben. Entsprechend existiert hier eine Verbindung zur ökonomischen Zieldimension.

Falls eine Monetarisierung nicht möglich ist, können die Vorteile qualitativ, etwa ähnlich des Vorgehens für die Bewertung des Umsetzungsaufwands in Kapitel 5.4.3, mit einer freigewählten Gewichtung einbezogen werden. Ebenso stehen die in Kapitel 2.4.2 genannten weiteren Methoden zur Bewertung von nichtenergetischen Vorteilen zur Verfügung. Das so entstehende Vorgehen ist in Abbildung 40 dargestellt.



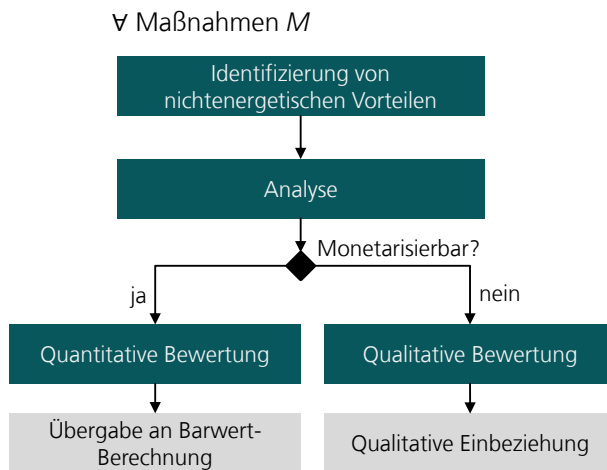


Abbildung 40: Vorgehen Bewertung nichtenergetischer Vorteile

#### 5.4.6. Bewertungssystem

In Summe ergibt sich ein Bewertungssystem aus den drei Dimensionen umsetzungsbezogene, ökonomische und ökologische Bewertung. Wechselwirkungen stellen keine eigene Bewertungsdimension dar, sondern repräsentieren einen Korrekturfaktor durch positive oder negative Beeinflussungen der betrachteten Energieeffizienzmaßnahmen.

Darüber hinaus werden weitere optionale Kontextfaktoren betrachtet, welche für die Bestimmung von optimalen Investitionsprogrammen von Energieeffizienzmaßnahmen in der Fabrik nicht zwingend notwendig sind, jedoch je nach Anwendungsfall vom Entscheider als relevant eingestuft werden können:

Es kann die Maßnahmenkategorie der Energieeffizienzmaßnahme erfasst werden. Diese ist für die Ermittlung von optimalen Investitionsplänen nicht notwendig, kann jedoch Grundlage für weitere Nebenbedingungen sein, die vom Entscheider berücksichtigt werden möchten. So können etwa Mindestanforderungen an einzelne Maßnahmenkategorien berücksichtigt werden, etwa dass ein minimaler Anteil der umgesetzten Maßnahmen im Bereich der Wärmeversorgung umgesetzt wird. Aufgrund

der Eignung des Entscheidungsmodells für alle Systemebenen der Fabrik von einzelnen Prozessen bis hin zu Produktionsnetzwerken wird keine explizite Auswahl an möglichen Energieeffizienzmaßnahmen-Kategorien vorgegeben, da diese als nicht abgeschlossen gelten kann. Die Festlegung der betrachteten Kategorien ist demnach dem Entscheider überlassen und kann je nach Anwendungsfall individuell und nach Betrachtungsebene festgelegt werden.

Ebenso wird aufgrund der Eignung für alle Systemebenen der Fabrik, welche auch internationale Produktionsnetzwerke beinhaltet, die Möglichkeit gegeben, die Region der Energieeffizienzmaßnahme zu erfassen, was etwa auf Ebene von Ländern geschehen kann. Durch die Erfassung können vom Entscheider Anforderungen in Bezug auf die regionale Verteilung berücksichtigt werden. So kann es etwa der Fall sein, dass Entscheider einen Mindestanteil der Maßnahmen in Europa verorten möchten, da hier höhere Energiepreissteigerungen erwartet werden. Da die Lokalität der Energieeffizienzmaßnahme nur von Bedeutung ist, wenn diese in Form einer Nebenbedingung berücksichtigt werden soll, handelt es sich ebenfalls um ein optionales Bewertungskriterium.

Nicht explizit im Bewertungssystem enthalten und vorausgesetzt ist die Umsetzbarkeit der betrachteten Energieeffizienzmaßnahmen. Zudem werden weitere denkbare Eigenschaften, etwa in Bezug auf die benötigte Fläche der Maßnahmen, nicht explizit einbezogen. Diese können jedoch optional, insbesondere bei konkurrierenden Ressourcen, aufgenommen und bei der Entscheidung über Nebenbedingungen berücksichtigt werden.

Für die im Anschluss an die Ergebnisfindung mithilfe des Entscheidungsmodells durchgeführte Monte-Carlo-Simulation kann zudem der Energieträger der Maßnahmen erfasst werden, um so energieträgerspezifische Preissteigerungen simulativ erfassen zu können. Dies stellt ebenfalls ein optionales Bewertungskriterium dar.

Das entstehende Bewertungssystem für Energieeffizienzmaßnahmen ist in Tabelle 17 zusammengefasst.

Tabelle 17: Zieldimensionen und Bewertungskriterien

<b>Bewertungsdimension</b>	<b>Bewertungskriterium</b>	<b>Beschreibung</b>
<b>Ökologisch</b>	Jährliche Energieeinsparung [kWh/a]	Jährliche Energieeinsparung
	<i>Optional:</i> Jährliche CO <sub>2</sub> -Einsparung [kgCO <sub>2</sub> eq/a]	Jährliche Reduktion der Emissionen in CO <sub>2</sub> -Äquivalent
	<i>Optional: Weitere</i>	
<b>Ökonomisch</b>	Kapitalwert [€]	Dynamische Investitionsbewertung
	Dynamische jährliche Kosteneinsparungen [€/a]	Einganggröße für Kapitalwertberechnung
	Investitionshöhe [€]	Einganggröße für Kapitalwertberechnung
	Nutzungsdauer [a]	Einganggröße für Kapitalwertberechnung
	<i>Optional: Weitere</i>	
<b>Umsetzungsbezogen</b>	Risikowert [dimensionslos]	Risikobewertung
	Umsetzungsaufwand [dimensionslos]	Qualitative Bewertung
	<i>Optional:</i> Nichtenergetische Vorteile [dimensionslos]	
<i>Optional: Weitere</i>		
<b>Kontext</b>	<i>Optional</i> Maßnahmenkategorie [dimensionslos]	Beschreibung der Maßnahmenkategorie, etwa Druckluft, Beleuchtung
	<i>Optional:</i> Energieträger [dimensionslos]	Beschreibung des Energieträgers, etwa Strom oder Gas
	<i>Optional</i> Region [dimensionslos]	Beschreibung der Region oder des Landes der Maßnahmenumsetzung
	Wechselwirkungseffekt [dimensionslos]	Wechselwirkungsbewertung

## 5.5. Auswahl relevanter Nebenbedingungen

Nebenbedingungen können sowohl in Form von Gleichungen als auch Ungleichungen vorliegen. Aus Sicht des Entscheiders werden durch Formulierung der Nebenbedingungen dessen Anforderungen an die Lösung ausgedrückt. Diese können in Form von begrenzten Ressourcen, etwa dem Investitionsbudget, vorliegen, aber auch Mindestanforderungen, etwa in Bezug auf die erzielten jährlichen Energieeinsparungen, darstellen.

Bislang bei der optimierten Auswahl von Energieeffizienzmaßnahmen berücksichtigte Nebenbedingungen wurden im Rahmen der Analyse des Stands der Technik und Wissenschaft vorgestellt und in Tabelle 7 zusammengefasst. Ausgangslage für die Identifizierung von zu berücksichtigenden Nebenbedingungen ist neben den bislang in der Literatur vorgestellten Nebenbedingungen das in Kapitel 5.4 dargelegte Bewertungssystem für Energieeffizienzmaßnahmen. Hierdurch ergibt sich das in Abbildung 41 gezeigte Vorgehen für die Ableitung der Nebenbedingungen.

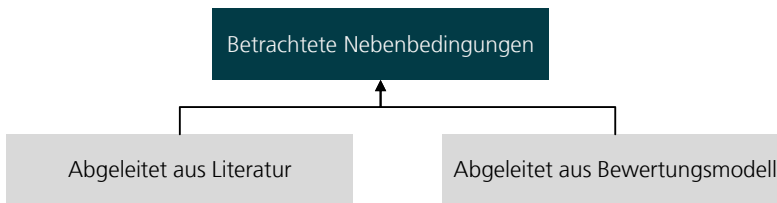


Abbildung 41: Ableitung betrachteter Nebenbedingungen

Ausgangsbasis für die Auswahl relevanter Nebenbedingungen ist die Auffassung, dass in Bezug auf die Nebenbedingungen, welche aus dem Bewertungssystem abgeleitet werden, eine Reduktion nicht naheliegend oder begründbar erscheint. Alle Bewertungskriterien der Energieeffizienzmaßnahmen beeinflussen die Bestimmung des optimalen Investitionsprogramms. Entsprechend können aus Sicht des Entscheiders an alle Bewertungskriterien weitere Anforderungen an die Lösung in Form von Nebenbedingungen beziehungsweise auf die Bewertungskriterien gestellt werden.

Es erscheint darüber hinaus sinnvoll, die Menge der aus den Bewertungskriterien abgeleiteten Nebenbedingungen zu erweitern. So können Entscheider neben einem Höchstwert für das mittlere Risiko der ausgewählten Energieeffizienzmaßnahmen zudem

ein maximal akzeptiertes Risiko auf Einzelmaßnahmenebene angeben, ab dem das mit der Umsetzung einer Energieeffizienzmaßnahme verbundene Risiko für das Unternehmen nicht mehr vertretbar ist. Weiter ist die Art der Nebenbedingungen zu motivieren, wobei zwischen Gleichungen und Ungleichungen zu unterscheiden ist. Bei den mit dem Risiko verbundenen Nebenbedingungen erscheint eine Angabe von Gleichungen nicht zielführend. Diese würde bedeuten, dass Entscheider exakt einen bestimmten Risikowert einhalten möchten. Da ein geringes Risiko jedoch strikt einem höheren Risiko vorgezogen wird, ist die Angabe einer Nebenbedingung in Form einer Gleichung in diesem Fall nicht zielführend.

Aufgrund der Anforderung, dass das Entscheidungsmodell für alle Systemebenen der Fabrik geeignet ist, können weitere mögliche Nebenbedingungen abgeleitet werden. So können auf der Stufe der Produktionsnetzwerke, welche nach Kapitel 2.1.4 die Gesamtheit der an der Herstellung eines Produktes beteiligten Werke und Fabriken darstellen, Energieeffizienzmaßnahmen in verschiedenen Regionen oder Ländern verortet sein. Aus Sicht des Unternehmens kann es sinnvoll sein, Anforderungen an die regionale Verteilung zu stellen, um etwa zu verhindern, dass Maßnahmen nur in einer Region umgesetzt werden. Entsprechend werden in Bezug auf die Nebenbedingungen die Möglichkeit einbezogen, Anforderungen an die regionale Verteilung zu stellen. Diese erfolgt in Form einer Ungleichung, bei der für eine mögliche Region  $R_k$  die Anzahl der umgesetzten Maßnahmen  $m_{1,R_k}$  auf eine Höchstzahl  $k$  begrenzt wird.

$$\sum_{i=1}^n m_{1,R_k} \leq k \quad (5.12)$$

Ebenso kann es aus Sicht des Entscheiders sinnvoll erscheinen, bei bestimmten Maßnahmenkategorien minimale oder maximale Umsetzungsgrade der Maßnahmen festzulegen. Entsprechend wird in Bezug auf die Nebenbedingungen die Möglichkeit einbezogen, Anforderungen an die Verteilung in Bezug auf Maßnahmenkategorien zu setzen. Diese erfolgt in Form einer Ungleichung, bei der bezogen auf eine mögliche Maßnahmenkategorie  $M_k$ , die Anzahl der umgesetzten Maßnahmen  $m_{1,M_k}$  auf eine Anzahl  $k$  begrenzt wird. Analog kann ein minimaler Faktor implementiert werden.

$$\sum_{i=1}^n m_{1,M_k} \leq k \quad (5.13)$$

Unter Berücksichtigung des Bewertungsmodells für Energieeffizienzmaßnahmen ergeben sich die in Tabelle 18 zusammengefassten Nebenbedingungen, welche in Summe alle bisher in der Literatur verwendeten Nebenbedingungen umfassen und diese durch weitere ergänzen.

Tabelle 18: Auswahl Nebenbedingungen

Nebenbedingung	Art	Bezeichnung
Jährliche Energieeinsparung [kWh/a]	Ungleichung/Gleichung	NB_EEnergie
Jährliche CO <sub>2</sub> -Einsparung [kgCO <sub>2</sub> eq/a]	Ungleichung/Gleichung	NB_ECO2
Gesamtkapitalwert [€]	Ungleichung/Gleichung	NB_K
Jährliche Kosteneinsparungen [€/a]	Ungleichung/Gleichung	NB_JK
Investitionshöhe [€]	Ungleichung/Gleichung	NB_IH
Mittleres Risiko	Ungleichung	NB_RM
Maximales Risiko	Ungleichung	NB_RMax
Lokale Verteilung Maßnahmenkategorie <i>i</i>	Ungleichung/Gleichung	NB_LV_i
Mindestumsetzung Maßnahmenkategorie <i>i</i>	Ungleichung/Gleichung	NB_MU_i

## 5.6. Ableitung der Entscheidungsregeln

Die vorangegangenen Kapitel bilden die Grundlage für die Ableitung der Entscheidungsregeln. Basierend auf Energieeffizienzmaßnahmen, die mithilfe des Bewertungsmodells bewertet wurden, und dem vorgestellten Zielsystem erfolgt die optimierte Bestimmung des Investitionsplans. Falls notwendig, werden zu minimierende

Zielkriterien zu Maximierungsproblemen umgeformt, indem die Zielkriterien mit  $-1$  multipliziert werden.

Die Kriterien  $C_j$  repräsentieren die Zieldimensionen des hierarchischen Bewertungssystems auf der höchsten Stufe. Zunächst erfolgt die Aufstellung einer Entscheidungsmatrix, in der die Ausprägungen  $d_{ij}$  aller Zielkriterien  $C_j$  mit  $j = 1, \dots, k$  für alle betrachteten Energieeffizienzmaßnahmen  $m_i$  mit  $i = 1, \dots, n$  und  $d_{ij} \in \mathbb{R} \forall i = 1, \dots, n \quad \forall j = 1, \dots, n$  eingetragen sind.

$$\begin{array}{c} C_1 \quad C_j \quad C_k \\ m_1 \begin{bmatrix} d_{11} & d_{1j} & d_{1k} \\ m_i \begin{bmatrix} d_{i1} & d_{ij} & d_{ik} \\ m_n \begin{bmatrix} d_{n1} & d_{nj} & d_{nk} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \end{array} \quad (5.14)$$

Es erfolgt eine Normalisierung der Entscheidungsmatrix:

$$\forall d_{ij} \neq 0: r_{ij} = \frac{d_{ij}}{\sum_{i=1}^n d_{ij}} \quad \forall i = 1, \dots, n \quad \forall j = 1, \dots, m \quad (5.15)$$

$$\forall d_{ij} = 0: r_{ij} = 0 \quad \forall i = 1, \dots, n \quad \forall j = 1, \dots, m$$

Durch Normalisierung entsteht die normalisierte Entscheidungsmatrix  $R$ , hier dargestellt auf der höchsten Stufe des Zielsystems:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{1j} & r_{1m} \\ r_{i1} & r_{ij} & r_{im} \\ r_{n1} & r_{nj} & r_{nm} \end{bmatrix} \quad (5.16)$$

Durch Multiplikation der normalisierten Entscheidungsmatrix mit der vom Entscheider mithilfe des analytischen Hierarchieprozesses ermittelten Gewichtung, ergibt sich die gewichtete normalisierte Entscheidungsmatrix  $V$ :

$$V = \begin{bmatrix} v_{11} & v_{1j} & v_{1m} \\ v_{i1} & v_{ij} & v_{im} \\ v_{n1} & v_{nj} & v_{nm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_1 r_{11} & w_j r_{1j} & w_m r_{1m} \\ w_1 r_{i1} & w_j r_{ij} & w_m r_{im} \\ w_1 r_{n1} & w_j r_{nj} & w_m r_{nm} \end{bmatrix} \quad (5.17)$$

Die nun gewichtete und normalisierte Entscheidungsmatrix würde im Falle eines MADM-Verfahrens wie AHP, TOPSIS oder der Nutzwertanalyse genutzt werden, um eine Rangordnung der Energieeffizienzmaßnahmen zu ermitteln.

Aufgrund der vorhandenen Nebenbedingungen ist dies jedoch nicht möglich und es muss in einem weiteren Schritt eine mathematische Optimierung für die Identifikation der Maßnahmenbündel durchgeführt werden. In diesem Fall handelt sich bei dem vorliegenden Ansatz um eine wie in 2.3.5 beschriebene Kombination von MADM und MODM.

Unter Berücksichtigung der zuvor vorgestellten Ergebnisse ergibt sich folgendes Optimierungsproblem:

$$\max_A \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m v_{ij} * m_i \quad (5.18)$$

$$u. d. N \begin{cases} h_u(A) = 0, u \in \{1, \dots, n\} \\ g_v(A) \leq 0, v \in \{1, \dots, n\} \end{cases}$$

$$A = \{m_{1j}, m_{2j}, \dots, m_{nj}\} \text{ mit } j \in \{0,1\} \text{ und } m = 1 \dots n$$

Im Rahmen des definierten Optimierungsproblems erfolgt die Ermittlung eines optimalen Maßnahmenbündels  $A$  unter Einhaltung der relevanten Nebenbedingungen. Hierbei werden unter der zuvor gewählten Gewichtung die Ausprägungen der Zielkriterien maximiert.

Zur Lösung des Problems unter den gewählten Voraussetzungen können verschiedene Optimierungsalgorithmen verwendet werden, welche die Anforderungen der Problemklasse der ganzzahligen Optimierung erfüllen, etwa das in 2.3.6 vorgestellte Branch-and-bound-Verfahren.



## 5.7. Monte-Carlo-Simulation

Mithilfe der Monte-Carlo-Simulation wird im Anschluss an die Bestimmung des optimalen Investitionsprogramms dessen Verhalten bei Variation verschiedener Einflussfaktoren berücksichtigt, welche die Wirtschaftlichkeit des Investitionsprogramms beeinflussen. Wie in Kapitel 2.5.2 gezeigt, ist die Wahl der zugrunde liegenden Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion von entscheidendem Einfluss bei der Durchführung einer Monte-Carlo-Simulation, wobei in Tabelle 6 Beispiele für Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen und deren Anwendungsbereiche vorgestellt wurden.

Das grundlegende Konzept der implementierten Monte-Carlo-Simulation ist auf aggregierter Ebene in Abbildung 42 ersichtlich. Zunächst wird zwischen maßnahmenübergreifenden und maßnahmenspezifischen Modulen unterschieden. Erstere beziehen sich nicht auf individuelle Energieeffizienzmaßnahmen, sondern stellen übergreifende Einflussfaktoren und Parameter dar.

Bei den maßnahmenspezifischen Modulen werden Einflüsse auf die jährlichen Kosteneinsparungen der Energieeffizienzmaßnahmen simuliert, wobei hier als maßnahmenübergreifender Faktor Energiepreissteigerungen berücksichtigt werden, welche die jährlichen Kosteneinsparungen beeinflussen.

Zudem werden Abweichungen von der erwarteten Investitionshöhe simuliert, da davon ausgegangen wird, dass die geplante Investitionshöhe nicht zwingend mit den tatsächlich anfallenden Kosten übereinstimmt.

Ebenso wird in einem Modul einbezogen, dass die erwartete Energieeinsparung einer Energieeffizienzmaßnahme von der erwarteten Einsparung abweichen kann.

In Summe werden so alle Faktoren mit einem Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit der Energieeffizienzmaßnahmen des Investitionsprogramms berücksichtigt. Simulationsgröße ist der Kapitalwert des Investitionsprogramms. Dieser wird in jedem Simulationslauf unter Variation der einzelnen Einflussfaktoren bestimmt und nach Ende der Simulation mithilfe von Histogrammen und weiteren Kennwerten ausgewertet.

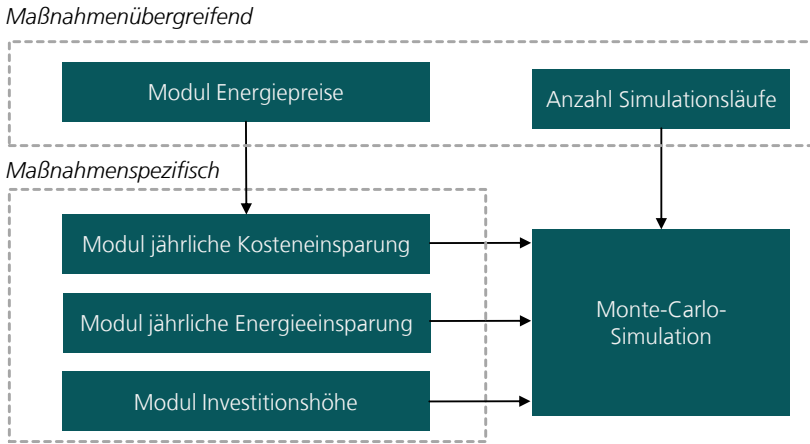


Abbildung 42: Konzept Monte-Carlo-Simulation

Für die Simulationsmodule der jährlichen Energieeinsparung und der Investitionshöhe ist das Konzept in Abbildung 43 dargestellt. Es erfolgt zunächst die Auswahl der statistischen Verteilung der Simulationsgröße. Anschließend erfolgt die Festlegung der Parameter der statistischen Verteilung. Im Falle einer Gleichverteilung erfolgt dies etwa durch Festlegung der beiden Parameter  $a, b \in \mathbb{R}$ , welche den unteren und oberen Grenzwert bestimmen. Im weiteren Verlauf wird nun die Investitionshöhe aller im Investitionsprogramm vorhandenen Energieeffizienzmaßnahmen simuliert, wobei die Anzahl der Simulationsläufe  $n$  durch den Anwender festgelegt wird.

Anschließend wird das Ergebnis der Simulation in Form einer Matrix aufgezeigt, bei der die Zeilen alle Energieeffizienzmaßnahmen  $m_i$  mit  $i = 1, \dots, n$  und die Spalten die Ergebnisse der Simulationsläufe  $n_j$  mit  $j = 1, \dots, n$  darstellen:

$$\begin{matrix}
 & C_1 & C_j & C_k \\
 m_1 & \left[ \begin{matrix} d_{11} & d_{1j} & d_{1k} \end{matrix} \right] \\
 m_i & \left[ \begin{matrix} d_{i1} & d_{ij} & d_{ik} \end{matrix} \right] \\
 m_n & \left[ \begin{matrix} d_{n1} & d_{nj} & d_{nk} \end{matrix} \right]
 \end{matrix} \tag{5.19}$$

$\forall$  Maßnahmen  $M$  und alle Module  $k$ :

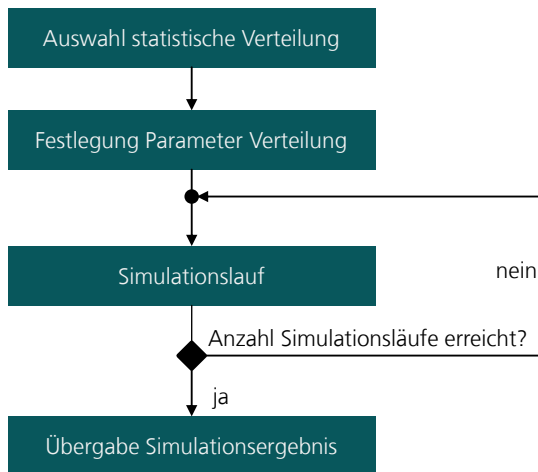


Abbildung 43: Simulationsmodule Investitionshöhe und Energieeinsparung

Aufgrund der Anforderung, dass das Entscheidungsmodell für alle Systemebenen der Fabrik geeignet ist, kann bei der Simulation der Energiepreisteigerungen zwischen regionenspezifischen und -übergreifenden Energiepreisteigerungen differenziert werden. Aus Sicht des Unternehmens können hierdurch die erwarteten Auswirkungen von unterschiedlichen Preisveränderungen in bestimmten Ländern oder Regionen berücksichtigt werden.

Bei der regionenspezifischen Betrachtung der Energiepreise wird von einem grundsätzlichen Trend ausgegangen, der etwa durch den Weltpreis des Energieträgers bestimmt ist. Dies kann im Falle des Energieträgers Öl etwa der Referenzpreis für die Rohölsorten Brent oder WTI sein. Neben diesem generellen Trend wird von weiteren regionenspezifischen Effekten ausgegangen, die sich in ihrem Einfluss je nach Energieträger unterscheiden. So ist bei der angesprochenen Betrachtung des Energieträgers Öl von einer sehr hohen Beeinflussung durch weltweite Preistrends

auszugehen, während bei dem Energieträger Strom von hohen regionalen Unterschieden auszugehen ist.

In Summe ergibt sich so eine Überlagerung von zwei stochastischen Variablen, die in Summe die jahres- und regionenspezifische Energiepreissteigerung eines Energieträgers bestimmen. Es müssen zuvor für alle Betrachtungsjahre des Investitionsprogramms die maximale Nutzungsdauer der vorhandenen Energieeffizienzmaßnahmen ermittelt werden, da diese den Zeitraum der Simulation bestimmen.

Für ein bestimmtes Jahr  $i$  mit  $i = 1, \dots, \max(\text{Nutzungsdauer}M)$ , einen Energieträger  $e$  mit  $i = 1, \dots, m$  und eine Region  $r$  mit  $r = 1, \dots, n$  ergibt sich folgende Berechnung:

$$X_{e,i} = X_{e,i,R} + X_{e,i,R\bar{U}} \quad (5.20)$$

$X_{e,i,R}$  steht dabei für die jahres- und regionenspezifische Veränderung und  $X_{e,i,R\bar{U}}$  für die regionenübergreifende Veränderung.

Die Ergebnisse eines exemplarischen Simulationslaufs für einen Energieträger sind in Abbildung 44 dargestellt. Zu beachten ist, dass dies eine mögliche regionenspezifische Entwicklung darstellt. Aufgrund der Zufallsnatur können die Ergebnisse je nach Simulationslauf ein stark abweichendes Bild ergeben. Im Rahmen der Monte-Carlo-Simulation wird dies genutzt und für jeden Simulationslauf eine spezifische Entwicklung im Rahmen der Modellparameter über die gesamte Betrachtungsdauer festgelegt und verwendet. Für eine Monte-Carlo-Simulation mit eintausend Simulationsläufen würde entsprechend die gleiche Anzahl an möglichen regionenspezifischen Energiepreisentwicklungen ähnlich Abbildung 44 generiert werden, die exemplarisch für den Energieträger Strom simuliert wurde.

Vorteil des zu entwickelnden Vorgehens ist die mögliche Integration in ein umfassendes Risikomanagement, bei dem die Auswirkungen von Energiepreissteigerungen, die Abkopplung von diesen durch Energieeffizienzmaßnahmen sowie mögliche Maßnahmen zur Absicherung von Energiepreisen einbezogen und quantifiziert werden können.

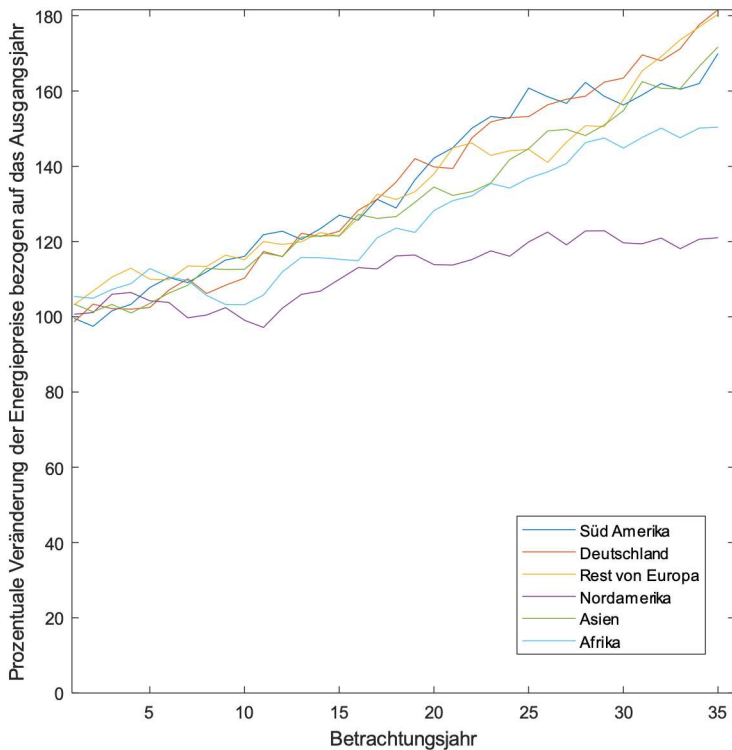


Abbildung 44: Simulationslauf der regionenspezifischen Energiepreisentwicklung

Zusammenfassend ergibt sich für die Ermittlung der jährlichen Kosteneinsparungen das in Abbildung 45 dargestellte Simulationsmodul. Vom Anwender kann frei entschieden werden, ob regionenspezifische Veränderungen berücksichtigt werden sollen.

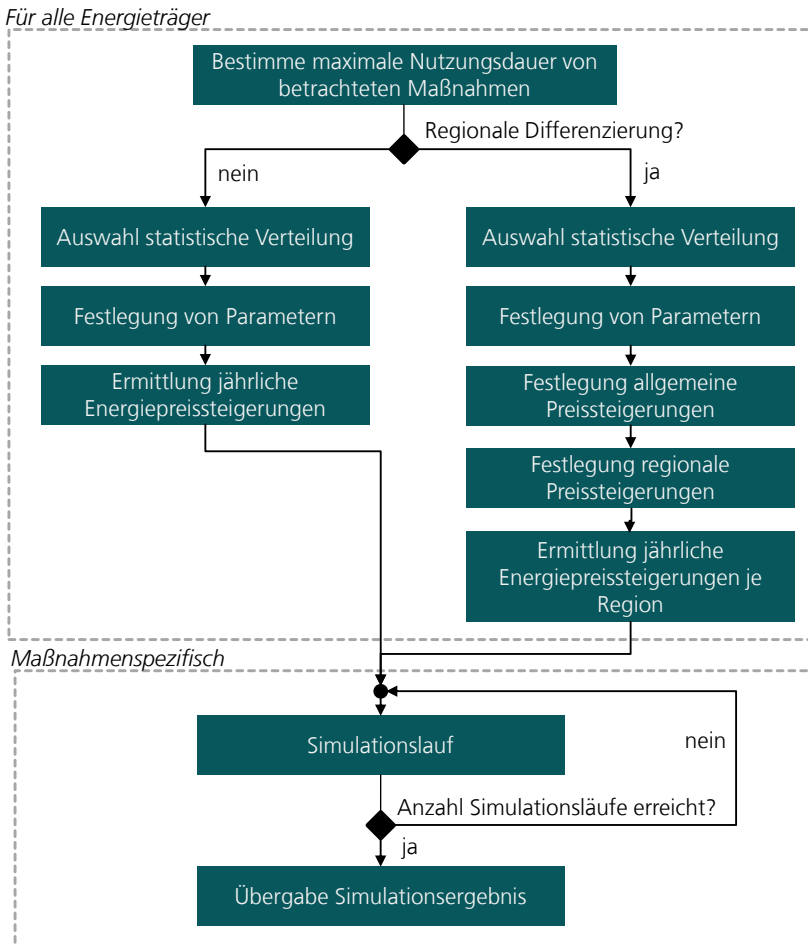


Abbildung 45: Simulationsmodul der jährlichen Kosteneinsparung

Nach simulativer Betrachtung der einzelnen Einflussfaktoren erfolgt die Ermittlung des erzielten Kapitalwerts des betrachteten Investitionsprogramms für jeden Simulationslauf. Im Anschluss einer Simulation werden relevante Kennzahlen für den Anwender ermittelt, welche in Tabelle 19 ersichtlich sind. Die dargestellten Kennwerte werden in

Darstellungen aufbereitet, welche der möglichst einfachen Interpretierbarkeit der erzielten Ergebnisse dienen.

Tabelle 19: Kennwerte Monte-Carlo-Simulation

Kennwert	Beschreibung
Mittelwert	Mittlerer Kapitalwert des Investitionsprogramms innerhalb der Simulationsergebnisse.
Mittelwert $\pm 2\sigma$	Intervall, in dem sich 95,45 % aller ermittelten Simulationsergebnisse befinden.
5%-Quantil	In 95 % der Simulationsläufe ist der ermittelte Kapitalwert größer als dieser Wert.

## 5.8. Entscheidungsvisualisierung

Basierend auf den Ergebnissen des zuvor vorgestellten Entscheidungsmodells erfolgt die Ableitung einer Entscheidungsunterstützung in Form von Visualisierungen, welche den Entscheider unterstützen, die zuvor ermittelten optimalen Investitionsprogramme zu interpretieren und darauf aufbauend eine Auswahl zu treffen. Die Visualisierung stellt keinen eigenen Schritt des Entscheidungsmodells dar, sondern baut auf den erzielten Ergebnissen des Entscheidungsmodells auf und stellt den letztendlichen Nutzen des Entscheidungsmodells für den Entscheider dar.

Angelehnt an das zuvor vorgestellte Vorgehen werden Darstellungen entwickelt, welche zwischen Entscheidungsfindung, der Auswahl eines optimalen Investitionsprogramms für Energieeffizienzmaßnahmen sowie einer Entscheidungsanalyse unterscheiden. Die Entscheidungsanalyse fokussiert sich auf ein ausgewähltes Investitionsprogramm und untersucht dessen Verhalten mit Hilfe einer Monte-Carlo-Simulation.

Abbildung 46 stellt das zentrale Element der Entscheidungsvisualisierung für die Entscheidungsfindung dar, welches aus fünf Teilabbildungen besteht, bei denen jeweils auf der Abszisse die maximale Investitionshöhe aufgetragen ist. Auf der Ordinate sind in

den ersten beiden Darstellungen die erzielbare Energie- sowie CO<sub>2</sub>-Einsparung pro Jahr ersichtlich.

Im dritten Teil der Visualisierung ist der Kapitalwert der Investitionsprogramme aufgetragen. Um bereits in diesem Schritt Unsicherheiten zu berücksichtigen, werden die Ergebnisse einer für jeden Datenpunkt durchgeführten Monte-Carlo-Simulation in Form von Bändern aufgetragen. Innerhalb dieser befinden sich die im Rahmen der Simulation ermittelten Kapitalwerte. Die gewählten Simulationsparameter sind zuvor vom Entscheider festlegbar.

Für die Einbeziehung des Risikos wird neben der Summe der Risiken der in dem Investitionsprogramm enthaltenen Maßnahmen zudem das maximale Einzelrisiko betrachtet. Dies ist dadurch begründet, dass ein hohes Einzelrisiko für den Entscheider ebenfalls entscheidungsrelevant bei der Auswahl eines Investitionsprogramms ist, da etwa ein Investitionsprogramm mit einem im Vergleich geringeren Einzelrisiko präferiert wird.

Letztes Element ist die statische Amortisationszeit des Investitionsprogramms. Diese stellt ein weiteres Element für die wirtschaftliche Interpretation der ermittelten Investitionsprogramme dar. In Summe werden dem Entscheidenden so Darstellungen zur Verfügung gestellt, welche eine Unterstützung bei der Auswahl eines geeigneten optimalen Investitionsprogramms darstellen.



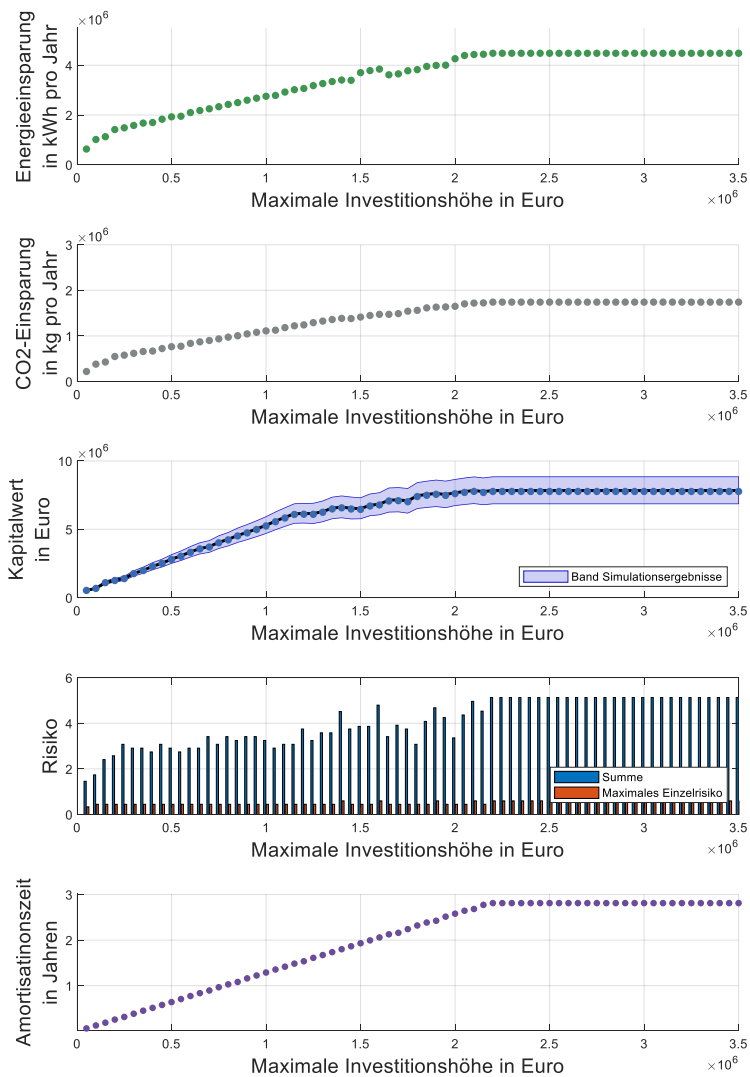


Abbildung 46: Entscheidungsunterstützung Auswahl Investitionsprogramm

Für eine möglichst hohe Entscheidungsunterstützung wird zudem eine Darstellung erstellt, in der die prozentualen Abweichungen der Zielkriterien um eine freigewählte maximale Investitionshöhe sowie ein freigewähltes Intervall um dieses betrachtet werden. Hierdurch können bei einer bereits grob ausgewählten maximalen Investitionshöhe die Abweichungen der Zielkriterien genauer betrachtet und analysiert werden. Abbildung 47 stellt eine exemplarische Darstellung für die so entstehende Entscheidungsanalyse dar.

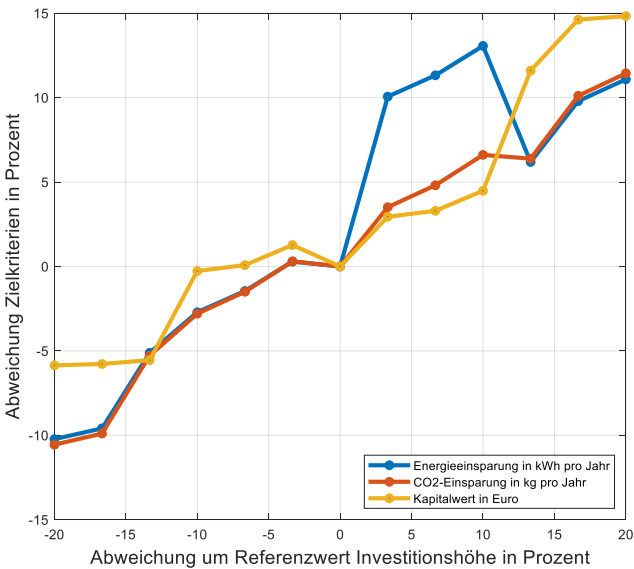


Abbildung 47: Analyse Abweichung Zielkriterien um Referenzwert

Basierend auf der Auswahl eines Investitionsprogramms wird im Rahmen der Entscheidungsanalyse das Verhalten eines ausgewählten Investitionsprogramms in vom Entscheider definierten Szenarien genauer betrachtet. Hierfür werden mit Hilfe der in Kapitel 5.7 vorgestellten Monte-Carlo-Simulation die Auswirkungen exogener Variablen auf die Wirtschaftlichkeit des Investitionsprogramms ermittelt.

Die für den Entscheider ermittelten Kennwerte sind neben dem Mittelwert des Kapitalwerts das  $2\sigma$ -Intervall, in dem sich etwas mehr als 95 % aller ermittelten

Simulationsergebnisse befinden. Ebenfalls ersichtlich ist das 5 %-Quantil. Dieses stellt einen zu erwartenden Unterwert dar, da in 95 % der durchgeführten Simulationen der Kapitalwert höher als dieser Wert ist.

Neben den zuvor vorgestellten Kennwerten werden zudem die Ergebnisse der durchgeführten Monte-Carlo-Simulation in Form eines Histogramms dargestellt. Innerhalb des Histogramms sind die zuvor beschriebenen Kennwerte visuell dargestellt. Dem Entscheider wird durch die Darstellung eine umfängliche Interpretation der Simulationsergebnisse ermöglicht. Zudem erfolgt die Darstellung der jährlichen, abgezinsten Zahlungsströme des Investitionsprogramms in einer weiteren Darstellung. Diese ermöglicht ein besseres Verständnis des Verhaltens des Investitionsprogramms über die Betrachtungsdauer, welche durch die Nutzungsdauer der beinhalteten Energieeffizienzmaßnahmen bestimmt ist.

In Summe wird so mit Hilfe von relevanten Bewertungskriterien eine Entscheidungsanalyse des ausgewählten Investitionsprogramms ermöglicht (vgl. Abbildung 48).

Kennwerte Investitionsprogramm	Tatsächliche Investitionshöhe in Millionen Euro:	1,49
	Mittelwert Kapitalwert in Millionen Euro:	6,66
	<b>Mittelwert <math>\pm 2\sigma</math> in Millionen Euro:</b>	[6,06; 7,26]
	<b>5%-Quantil in Millionen Euro:</b>	6,19

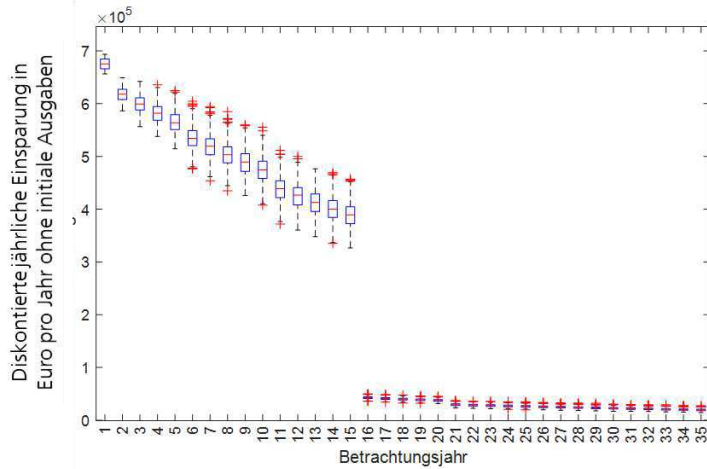
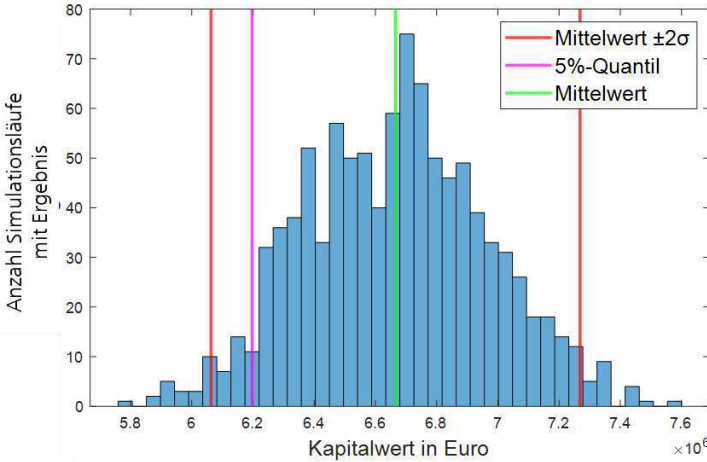


Abbildung 48: Entscheidungsunterstützung Analyse Investitionsprogramm

### 5.9. Zusammenfassung und Zwischenfazit

Aufbauend auf den in Abschnitt 4.2 definierten Anforderungen wurde im zurückliegenden Kapitel ein Entscheidungsmodell für die Bestimmung optimaler Investitionsprogramme von Energieeffizienzmaßnahmen in der Fabrik konzipiert.

Die hierfür notwendigen Bestandteile sind zunächst die mathematische Problem- und Aktionenformulierung, das Zielsystem sowie ein Bewertungsmodell für Energieeffizienzmaßnahmen einschließlich der notwendigen Bewertungsmethoden sowie der Formulierung von Entscheidungsregeln für die Ermittlung der optimalen Investitionspläne unter Einhaltung der Nebenbedingungen. In Summe bildet das Zusammenspiel der Bestandteile ein Entscheidungsmodell, welches Entscheidern die Möglichkeit bietet, die Auswahl von Energieeffizienzmaßnahmen im mathematischen Sinn optimal durchzuführen.

Aufbauend auf die mithilfe des Entscheidungsmodells durchgeführte Entscheidungsfindung wurde durch eine aufbauende Monte-Carlo-Simulation ein umfassendes Werkzeug für die Entscheidungsanalyse entwickelt. Dieses dient den Entscheidenden dazu, die Auswirkungen der bestimmten Investitionsprogramme in verschiedenen Szenarien zu ermitteln sowie maßnahmen- oder regionenspezifische Betrachtungen durchzuführen.

Kapitel 5 beantwortet in Summe die vierte Teilforschungsfrage bzgl. der Konzipierung eines Entscheidungsmodells für die Bestimmung optimaler Investitionspläne von Energieeffizienzmaßnahmen in der Fabrik. Auf Grundlage der erarbeiteten Ergebnisse erfolgt im nachfolgenden Kapitel die Anwendung des Entscheidungsmodells anhand von zwei Fallbeispielen für dessen Validierung.

Nachfolgend erfolgt die Implementierung und Validierung des entwickelten Entscheidungsmodells, um dessen Erfüllung der Anforderungen sowie den Nutzen des entwickelten Artefakts zu überprüfen.

## 6. Implementierung und Validierung

Das im vorgehenden Kapitel entwickelte Entscheidungsmodell bildet das Gestaltungsziel des gewählten Forschungsansatzes. Im nachfolgenden Kapitel werden zwei in Kapitel 1.3 vorgestellte Ansätze für dessen Validierung durchgeführt. Zum einen erfolgt der Nachweis der Nützlichkeit des Artefakts, indem dieses gegen einen Ausschnitt der Realwelt in Form von zwei Fallbeispielen validiert wird, um dessen Nutzen zu bewerten. Zum anderen wird das Artefakt gegen das identifizierte Forschungsdefizit validiert, indem die Erfüllung der an das Artefakt gestellten Anforderungen überprüft wird.

### 6.1. Methodisches Vorgehen

Für die Anwendung und Validierung des entwickelten Artefakts in Form eines Entscheidungsmodells ist dieses zunächst softwaretechnisch zu implementieren. Darauf aufbauend erfolgt eine anwendungsübergreifende theoretische Untersuchung des Entscheidungsmodells, welche unabhängig von Fallbeispielen durchgeführt wird. Im Vordergrund steht die Analyse der logischen Strukturen des Artefakts basierend auf einem Testdatensatz.

Anschließend erfolgt die Validierung des Entscheidungsmodells, indem das entwickelte Artefakt auf einen Ausschnitt aus der Realwelt in Form von zwei Fallbeispielen angewandt wird. Im Vordergrund steht dabei der Nachweis des Nutzens des Artefakts für den Entscheider. Dies bildet den ersten Validierungsansatz im Rahmen des gewählten Forschungsansatzes.

Das Kapitel endet mit einer Zusammenfassung, in der die Erfüllung der Anforderungen geprüft wird. Diese repräsentiert den zweiten Validierungsansatz des entwickelten Artefakts und bildet den letzten Baustein des Erkenntnisziels des Forschungsansatzes.

Das methodische Vorgehen der Implementierung und Validierung ist in Abbildung 49 zusammengefasst.

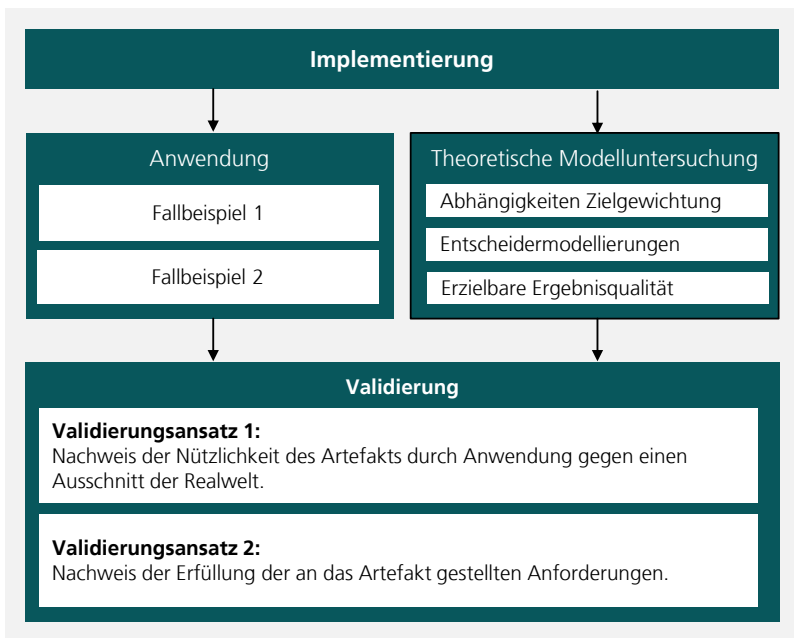


Abbildung 49: Methodisches Vorgehen der Implementierung und Validierung

## 6.2. Implementierung

Ausgewählt für die Implementierung wurde die Software MATLAB, eine plattformunabhängige Software des Unternehmens MathWorks zur Lösung vorwiegend mathematisch-technischer Probleme. Motivation für die Verwendung der Software ist deren Eignung für die Modellierung und Lösung mathematischer Probleme, die durch verschiedene zur Verfügung stehende Toolboxen vereinfacht wird. Die Umsetzung basiert auf dem Import der bewerteten Energieeffizienzmaßnahmen durch eine CSV-Datei. Für die Risikobewertung steht eine grafische Benutzeroberfläche basierend auf der Fuzzy-Logik-Toolbox zur Verfügung. Nach Import der Energieeffizienzmaßnahmen können sowohl Nebenbedingungen als auch Entscheiderpräferenzen an den Lösungsalgorithmus übergeben werden.

### 6.3. Anwendungsübergreifende Modelluntersuchung

Im folgenden Kapitel erfolgt eine anwendungsübergreifende Untersuchung des Entscheidungsmodells. Die Untersuchung des Entscheidungsmodells setzt die Verwendung eines Datensatzes an Energieeffizienzmaßnahmen voraus. Grundlage für die weiteren Analysen ist deshalb ein Testdatensatz, welcher als Synthese aus den nachfolgend betrachteten Fallbeispielen hervorgegangen ist. Entsprechend können die verwendeten Eingangsdaten trotz des anwendungsübergreifenden Charakters der nachfolgenden Analysen als Ausschnitt aus der Realwelt betrachtet werden.

#### 6.3.1. Analyse der Zielgewichtung

Entscheidenden Einfluss auf das Investitionsprogramm für Energieeffizienzmaßnahmen hat die vom Entscheider gewählte Zielgewichtung. Für die Analyse wurden mögliche Zielgewichtungen untersucht, indem das Entscheidungsmodell auf verschiedene Zielgewichtungen angewandt wurde, wobei der erzielbare Kapitalwert sowie die erzielbare jährliche Energieeinsparung als Zielgröße betrachtet wurden. Die verwendeten Zielgewichtungen für die Analyse sind im Einzelnen im Anhang ersichtlich. Abbildung 50 stellt die Ergebnisse dar. Auf den Achsen des Diagramms ist die individuelle Gewichtung der Zieldimension ersichtlich, während der erzielbare Kapitalwert des ermittelten optimalen Investitionsprogramms als vierte Dimension farblich codiert dargestellt ist. Es zeigt sich eine hohe Abhängigkeit des erzielbaren Kapitalwerts von der Gewichtung der umsetzungsbezogenen Zieldimension, die sich aus Risiken und Umsetzungsaufwand der Energieeffizienzmaßnahmen zusammensetzt. Mit ansteigender Gewichtung der Zieldimension nimmt der erzielbare Kapitalwert kontinuierlich ab.

Anschaulich repräsentiert eine höhere Gewichtung der umsetzungsbezogenen Zieldimension eine steigende Risikoaversion des Entscheiders, dessen Präferenz bei der Bestimmung des Investitionsprogramms zunehmend von einer Vermeidung von Risiken und Umsetzungsaufwand geprägt ist. Analog entspricht eine abnehmende Gewichtung der umsetzungsbezogenen Zieldimension einer zunehmenden Risikoaffinität, bei der der Entscheider im Extremfall Umsetzungsrisiken und -aufwand nicht in die Auswahl der Energieeffizienzmaßnahmen einschließt.



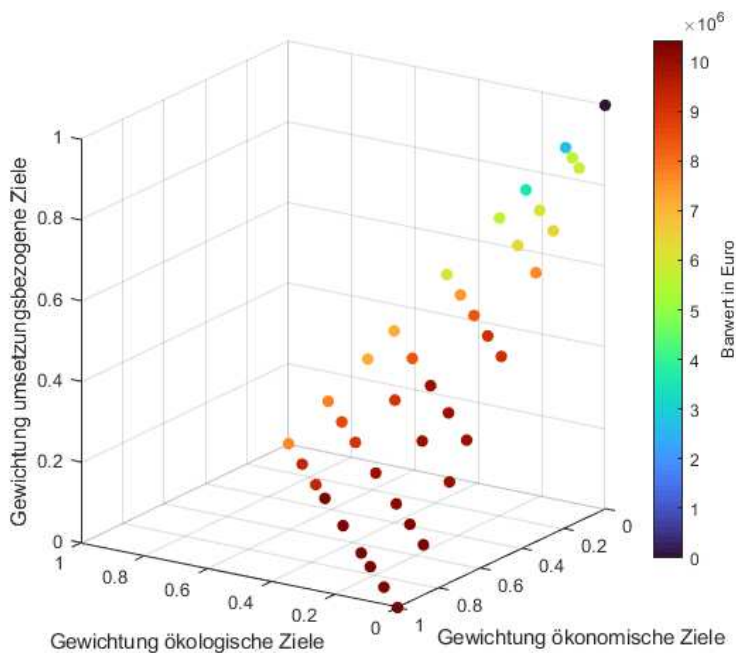


Abbildung 50: Analyse der Zielgewichtung mit erzielbarem Kapitalwert als Zielgröße

Aufgrund der zuvor beschriebenen Beobachtung bietet sich an, die verschiedenen Gewichtungen der Zieldimensionen in Entscheidermodellierungen zu überführen, welche exemplarische Entscheider und deren Präferenzen beschreiben. Hierbei kann zwischen zwei Dimensionen unterschieden werden. Auf der einen Seite steht eine Beschreibungsdimension, welche die Risikoaversion, bzw. Risikoaffinität, des Entscheiders beschreibt. Zu unterscheiden ist zwischen risikoaversen Entscheidern, welche vor allem Risiken in Bezug auf Energieeffizienzmaßnahmen vermeiden möchten und, wie in Kapitel 2.4.2. dargelegt, in der Energieeffizienz häufig anzufinden sind. Auf der anderen Seite steht der risikoaffine Entscheider, der bereit ist, ein höheres Risikoniveau zu akzeptieren. Weitere Unterscheidungsdimension des Entscheiders ist die zwischen ökologisch getriebenen Entscheidern, die vorgegebene Ziele in Bezug auf Energieeffizienzziele

umsetzen und diese entsprechend höher bewerten, sowie dem ökonomisch getriebenen Entscheider, der wirtschaftlichen Entscheidungskriterien eine höhere Gewichtung zuweist.

Hervorzuheben ist, dass es sich bei den beiden beschriebenen Dimensionen um komplementäre Beschreibungsdimensionen handelt. So kann ein risikoaverser Entscheider dennoch ökologisch respektive ökonomisch getrieben sein. Eine Ausnahme bilden lediglich die Randpunkte des Beschreibungsraums der Zielgewichtungen. An diesen ist der Entscheider ausschließlich durch eine Zieldimension getrieben und ignoriert die anderen. Abbildung 51 fasst die so definierten Dimensionen der entstehenden Entscheidermodellierungen qualitativ zusammen. Die Abbildung kann als eine Unterstützung für das Meta-Entscheidungsproblem der Bestimmung der Zielgewichtungen verwendet werden, welche mithilfe des analytischen Hierarchieprozesses erfolgt.

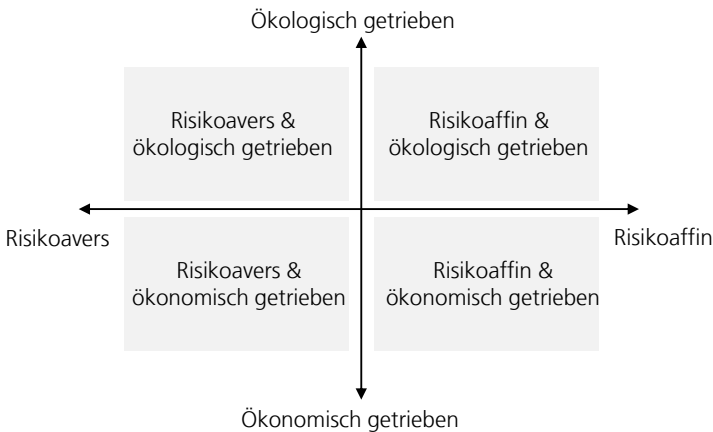


Abbildung 51: Qualitative Modellierung von Entscheidern

Für die Analyse der Abhängigkeit zwischen eingegangenen Risiken und erzielbarem Kapitalwert des ermittelten Investitionsprogramms bietet sich angelehnt an die Portfoliotheorie eine Darstellung an, bei der auf der Abszisse das normierte Risiko und der Ordinate der Kapitalwert aufgetragen ist. Abbildung 52 zeigt eine solche Darstellung

basierend auf einem Datensatz eines in Kapitel 6.4 zu motivierenden Fallbeispiels. Die grundlegende Struktur der Ergebnisse zeigt eine Ähnlichkeit mit einer Sigmoid-Funktion, bei der in Abhängigkeit des Risikos der Kapitalwert zunächst langsam, dann stark ansteigt und im Weiteren gegen einen Grenzwert konvergiert

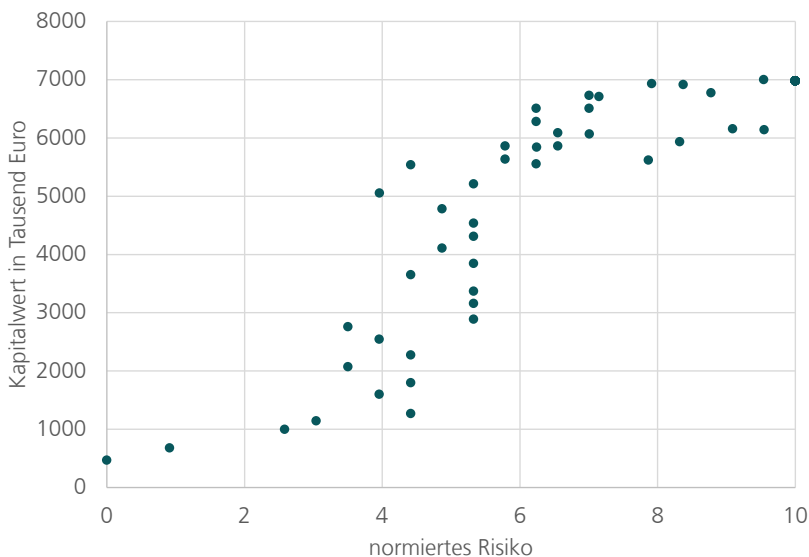


Abbildung 52: Abhängigkeit des erzielbaren Kapitalwert und des Risikos

### 6.3.2. Analyse der Lösungsqualität

Eine weitere anwendungsübergreifende Analyse des Entscheidungsmodells bezieht sich auf dessen erzielbare Lösungsqualität. Diese lässt sich definieren als erzielbare Ausnutzung des verfügbaren Investitionsbudgets. Hierdurch wird die Eigenschaft des Lösungsalgorithmus bewertet, eine möglichst passende Menge an Energieeffizienzmaßnahmen zu allokalieren.

Abbildung 53 ist die so definierte Lösungsqualität für drei verschiedene Gewichtungsszenarien der Zieldimensionen sowie unterschiedliche maximale Investitionsbudgets ersichtlich. Die maximale relative Abweichung beträgt  $-4,3\%$ , der

Mittelwert der relativen Abweichung beträgt je nach Gewichtung zwischen  $-0,1$  und  $-0,06$  %. Dies lässt bezogen auf den gewählten Testdatensatz auf eine hohe Stabilität der erzielten Lösungsqualität schließen.

Einschränkend ist jedoch auf die hohe Abhängigkeit der erzielten Lösungsqualität von den verfügbaren Energieeffizienzmaßnahmen zu verweisen. In einem hypothetischen Extremszenario mit wenigen Energieeffizienzmaßnahmen, die sich aufgrund eines begrenzten Investitionsbudgets nicht kombinieren lassen, da deren Kombination dieses überschreiten würde, wäre die erzielbare Lösungsqualität sehr gering. In einem weiteren angenommenen Extremszenario mit einer sehr hohen Anzahl an Energieeffizienzmaßnahmen mit möglichst geringen individuellen Investitionshöhen könnte das Investitionsbudget maximal ausgenutzt werden, da sich diese durch ihre individuell geringe Investitionshöhe gut kombinieren lassen.

Dennoch verdeutlicht die vorgestellte Analyse basierend auf einem praxisnahen Testdatensatz die grundsätzliche Fähigkeit des Entscheidungsmodells, ein verfügbares Investitionsbudget adäquat zu nutzen und hierdurch die Ausprägung der Zieldimensionen zu maximieren.

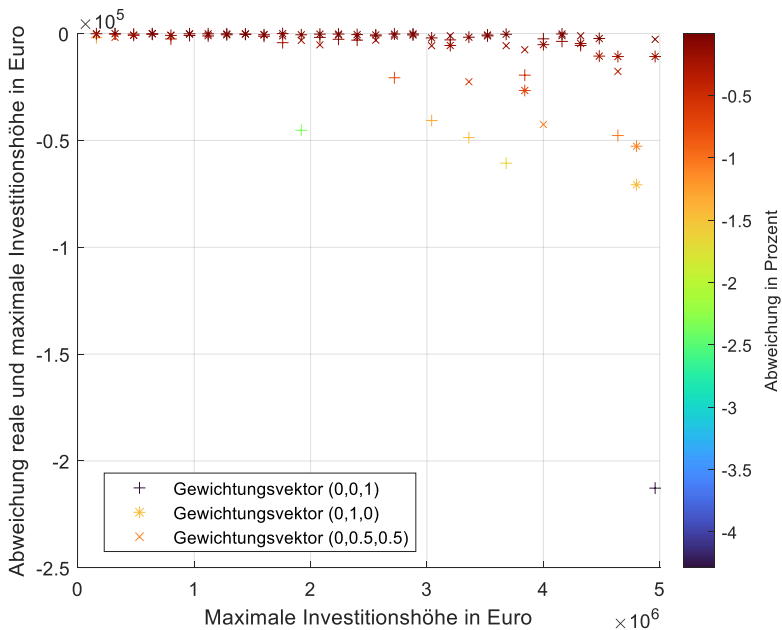


Abbildung 53: Analyse der Lösungsqualität in verschiedenen Szenarien. (Gewichtungsvektor: umsetzungsbezogene Ziele, ökonomische Ziele, ökologische Ziele)

### 6.3.3. Analyse der Maßnahmenauswahl

In einer weiteren Analyse des Entscheidungsmodells kann die Auswahl der Energieeffizienzmaßnahmen selbst analysiert werden. Es stellt sich hierbei die Frage, wie einzelne Maßnahmen über verschiedene Szenarien hinweg in die Bestimmung des Investitionsprogramms einfließen.

Für die Analyse wurde das Investitionsbudget in Schritten von 100.000 Euro bis auf 5 Millionen Euro erhöht und die Aufnahme der einzelnen Maßnahmen in das Investitionsprogramm betrachtet. Falls eine Energieeffizienzmaßnahme in einem Einzelexperiment ausgewählt wurde, ist dies mit einer 1 codiert worden, eine Nichtauswahl respektive mit einer 0.

In Tabelle 20 wurde farblich für die einzelnen Simulationsläufe dargestellt, wann eine Energieeffizienzmaßnahme in das Investitionsprogramm übernommen wurde. Hier zeigt sich besonders, dass Energieeffizienzmaßnahmen in teilweise aufeinander folgenden Anwendungen des Algorithmus alternierend ausgewählt und nicht ausgewählt wurden, um die Zielfunktion möglichst zu maximieren. Auf der anderen Seite gibt es Energieeffizienzmaßnahmen, die unter der gewählten Zielgewichtung und dem verfügbaren Investitionsbudget nicht in das Investitionsprogramm aufgenommen wurden, da diese durch ihre Charakteristik nicht die Zielfunktion maximieren.

Intuitiv lässt sich die Auswahl bei zunehmender Anzahl an Maßnahmen und aufgrund der Komplexität durch die multikriterielle Charakterisierung der Maßnahmen und der Zielkriterien nicht mehr nachvollziehen, da unter den verwendeten Nebenbedingungen eine abstrakte Maximierung der Zielfunktion durchgeführt wird. Dies unterstreicht jedoch den Nutzen des Artefakts für die Praxis bei der Bestimmung von optimalen Investitionsprogrammen unter den definierten Anforderungen, da diese manuell nicht mehr möglich erscheint.

Tabelle 20: Analyse der Maßnahmenauswahl (Grün entspricht Auswahl)

		Investitionsbudget in 100 Tausend Euro:																													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
M1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
M2	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
M3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
M4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
M5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
M6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
M7	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
M8	0	1	1	1	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
M9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	
M10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
M11	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
M12	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
M13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	1	0	1	
M14	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
M15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	
M16	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
M17	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
M18	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
M19	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
M20	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
M21	0	0	1	1	0	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
M22	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
M23	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
M24	0	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
M25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
M26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
M27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	
M28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
M29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1

### 6.3.4. Wechselwirkungsbewertung

In den nachfolgend zu betrachtenden Fallbeispielen wurden keine Wechselwirkungen von Seiten der Unternehmen gefunden. Um das quantitative Vorgehen der Wechselwirkungsbewertung dennoch validieren zu können, wird nachfolgend ein gesondertes Beispiel mit zwei Energieeffizienzmaßnahmen betrachtet. Auf eine Betrachtung der qualitativen Bewertung wird aufgrund der übernommenen Vorarbeiten von Dehning verzichtet.

Grundlage der weiteren Betrachtungen sind zwei Energieeffizienzmaßnahmen, die Dämmung der Gebäudehülle ( $m_D$ ) sowie der Einbau einer Wärmepumpe ( $m_{WP}$ ), welche

einen Gasheizkessel ersetzt. Die Charakteristik beider Einzelmaßnahmen ist in Tabelle 21 ersichtlich.

Tabelle 21: Betrachtete Energieeffizienzmaßnahmen Wechselwirkungsbewertung

	Maßnahme Dämmung	Maßnahme Wärmepumpe
Investitionshöhe in Euro	155000	150000
Energieeinsparung in kWh/a	150000	300000
Kosteneinsparung pro Jahr in Euro	15000	10000
CO <sub>2</sub> -Einsparung in kg CO <sub>2</sub> /a	30000	40000

Zwischen beiden Maßnahmen existieren verschiedene Wechselwirkungseffekte: Die Durchführung der Dämmungsmaßnahme wirkt sich positiv auf die Investitionshöhe der Wärmepumpe aus, da sich der Wärmebedarf des Gebäudes durch die Dämmung reduziert und diese entsprechend kleiner dimensioniert werden kann. In Summe verändern sich zudem die Energie-, CO<sub>2</sub>- und Kosteneinsparungen beider Maßnahmen durch den Wechsel auf den Energieträger Strom. Die Charakteristik als virtuelle Maßnahme ist in Tabelle 22 ersichtlich. Die Einspareffekte der gebündelten Maßnahme sind geringer als die Summe der Einzelmaßnahmen, da der Einspareffekt durch den Energieträgerwechsel bei der Dämmungsmaßnahme geringer ist.

Tabelle 22: Virtuelle Maßnahme „Umsetzung Wärmepumpe & Dämmung

	Maßnahmenbündelung
Investitionshöhe in Euro	265000
Energieeinsparung in kWh/a	330000
Kosteneinsparung pro Jahr in Euro	21250
CO <sub>2</sub> -Einsparung in kg CO <sub>2</sub> /a	55000



Für die Modellierung der Maßnahmen und deren Wechselwirkungen müssen entsprechend des Vorgehens Nebenbedingungen formuliert werden, welche eine gleichzeitige Auswahl der Einzelmaßnahmen und der virtuellen Maßnahme verhindern.

Bezogen auf das Beispiel kann entweder einzeln die Wärmepumpe oder die Dämmungsmaßnahme umgesetzt werden, bzw. beide Maßnahmen gebündelt, wodurch die beschriebenen Wechselwirkungseffekte einbezogen werden müssen. Aus technischer Sicht ist zudem darauf hinzuweisen, dass eine zeitlich nachgelagerte Umsetzung der Dämmungsmaßnahme nicht sinnvoll ist, da die Wärmepumpe in diesem Fall kleiner hätte ausgelegt werden können. Dies könnte zusätzlich durch eine weitere Nebenbedingung modelliert werden.

Für die Wechselwirkungsbewertung weiter durchzuführen ist die Formulierung der Nebenbedingungen für die Modellierung der möglichen Umsetzungspfade:

$$m_v = m_{WP} \cup m_D = \begin{cases} 1, & \text{Maßnahmen gemeinsam durchführen} \\ 0, & \text{Maßnahmen nicht gemeinsam durchführen} \end{cases} \quad (6.1)$$

Im Fall der zuvor betrachteten Maßnahmen  $m_{WP}$  und  $m_D$  wird dies folgendermaßen umgesetzt:

$$\begin{aligned} m_D + m_v &\leq 1 \\ m_{WP} + m_v &\leq 1 \end{aligned} \quad (6.2)$$

In Summe verdeutlicht die Analyse die Notwendigkeit einer quantitativen Wechselwirkungsbewertung, da die Charakteristik der Energieeffizienzmaßnahmen individuell stark durch Wechselwirkungseffekte beeinflusst werden kann.

#### 6.4. Anwendung des Entscheidungsmodells

In den nachfolgenden Kapiteln erfolgt der Nachweis der Nützlichkeit des Artefakts, indem dieses gegen Ausschnitte der Realwelt validiert wird, um dessen Nutzen zu bewerten.

### 6.4.1. Fallbeispiel 1

Im ersten Fallbeispiel wird die Situation eines diversifizierten Konzerns mit einem Fokus auf Maschinen- und Anlagenbau und weltweiten Standorten betrachtet. Das Unternehmen verfolgt eine Energie- und Klimastrategie und möchte verstärkt in Energieeffizienzmaßnahmen investieren. Aufgrund dessen sollen mit dem Entscheidungsmodell möglichst optimale Investitionspläne für Energieeffizienzmaßnahmen bestimmt werden.

Primäre Zielsetzung ist die Bestimmung von optimalen Investitionsplänen unter verschiedenen Investitionsbudgets als Entscheidungsvorlage für das Management. Sekundäre Zielsetzung ist ein besonderes Augenmerk auf die Verteilung der Energieeffizienzmaßnahmen, da sich diese nicht auf einzelne Regionen konzentrieren sollen.

#### 6.4.1.1. Energieeffizienzmaßnahmen

Für die Anwendung des Entscheidungsmodells stehen Energieeffizienzmaßnahmen zur Verfügung, welche an verschiedenen Standorten des Unternehmens durch Fachpersonal identifiziert und bewertet wurden. Diese wurden in einer Datenbank konsolidiert, welche als Grundlage für die Entscheidungsfindung dient. Die vom Unternehmen übergebenen Energieeffizienzmaßnahmen wurden zunächst auf ihre Plausibilität überprüft und um Maßnahmen bereinigt, bei denen auch auf Nachfrage notwendige Bewertungskriterien nicht vorhanden waren, etwa für die Berechnung des Kapitalwerts notwendige Investitionshöhen sowie jährliche Kosten- oder Energieeinsparungen.

Insgesamt werden 29 unterschiedliche Energieeffizienzmaßnahmen innerhalb des Fallbeispiels betrachtet (vgl. Tabelle 23).

Die Maßnahmen umfassen zu großen Teilen Querschnittstechnologien aus dem Bereich der Beleuchtung, der Wärmeversorgung, der Prozessoptimierung, der Energieeffizienz der Gebäudehülle. Besonderes Merkmal ist die geografische Verteilung der Maßnahmen, da diese neben Standorten in Deutschland zudem Standorte in Asien, Süd- und Nordamerika sowie Afrika umfassen

Insgesamt werden im Rahmen des Fallbeispiels 29 Energieeffizienzmaßnahmen betrachtet. Eine spezifische Darstellung der bewerteten Maßnahmen ist aufgrund einer Geheimhaltungsvereinbarung mit dem betrachteten Unternehmen nicht möglich, weshalb im nachfolgenden nur aggregierte Ergebnisse im Rahmen der Entscheidungsfindung und –analyse vorgestellt werden.

Tabelle 23: Betrachtete Maßnahmen Fallbeispiel 1

Maßnahmenkategorie	Anzahl
Beleuchtung	20
Druckluftsystem	1
Stand-by-Verbrauchsreduktion	1
Wärmesystem	2
Prozessoptimierung	1
Gebäudehülle	1
Motoren und Antriebe	1
Sonstige	2

Die vom Unternehmen bewerteten Energieeffizienzmaßnahmen erhalten grundsätzlich alle notwendigen Daten des Bewertungsmodells für Energieeffizienzmaßnahmen mit Ausnahme der Risiko- und Aufwandsbewertung, deren Umsetzung nachfolgend ersichtlich ist. Wechselwirkungen zwischen Maßnahmen wurden vom Unternehmen nicht gefunden, wodurch diese im weiteren Verlauf des Fallbeispiels nicht einbezogen werden. Optionale nichtenergetische Vorteile sind nicht einbezogen. Da von Seiten des Unternehmens eine Bewertung der CO<sub>2</sub>-Einsparungen nicht durchgeführt wurde, werden Emissionsfaktoren verwendet. Für die Emissionen des Energieträgers Strom werden Emissionsfaktoren des Umweltbundesamts basierend auf dem Strommix in Deutschland des Jahres 2021 genutzt, bei denen 0,420 kgCO<sub>2</sub>/kWh genannt werden (Umweltbundesamt 2022b). Für den Emissionswert des Energieträgers Erdgas werden Daten des Bundesamts für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle verwendet, die den CO<sub>2</sub>-Faktor für Erdgas mit 0,201 kgCO<sub>2</sub>/kWh beziffern (Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle 2022). Bezogen auf den Datensatz des Fallbeispiels ist hervorzuheben,

dass sich die überwiegende Mehrheit der betrachteten Energieeffizienzmaßnahmen auf den Energieträger Strom bezieht, dieser also tendenziell ausschlaggebend ist. Neben Strom und Gas sind keine weiteren Energieträger im betrachteten Datensatz vorhanden.

#### 6.4.1.2. Zielgewichtung

In einem ersten Schritt erfolgt die Festlegung der Gewichtung der Zieldimensionen. Hierfür wurde zunächst ein paarweiser Vergleich der Zieldimensionen basierend auf dem analytischen Hierarchieprozess durchgeführt. Für diese Vergleiche wurde die in Kapitel 5 vorgestellte Neun-Punkte-Skala von Saaty verwendet. Tabelle 24 stellt die Ergebnisse des paarweisen Vergleichs dar. Interpretation ist, dass den ökologischen Zielen eine erheblich höhere Bedeutung (5) als den umsetzungsbezogenen Zielen zugewiesen wird. Zudem wird den ökonomischen Zielen ein Zwischenwert zwischen erheblich größerer (6) und viel größerer Bedeutung (7) als den umsetzungsbezogenen Zielen zugeordnet. Den ökonomischen Zielen wurde zudem eine etwas größere Bedeutung als den ökologischen Zielen zugeordnet, wobei hier ebenfalls ein Zwischenwert zwischen gleicher und etwas größerer Bedeutung gewählt wurde.

Tabelle 24: Paarweiser Vergleich der Zieldimensionen in Fallbeispiel 1

	Umsetzungsbezogene Ziele	Ökologische Ziele	Ökonomische Ziele
Umsetzungsbezogene Ziele	1	1/5	1/6
Ökologische Ziele	5	1	1/2
Ökonomische Ziele	6	2	1

Durch Verwendung der Eigenwertmethode kann der Vektor der Zielgewichtung ermittelt werden, welcher in Tabelle 25 dargestellt ist. Dieser stellt die Gewichtung der Zieldimensionen bei der Bestimmung der optimalen Investitionsprogramme dar.

Tabelle 25: Gewichtung der Zieldimensionen in Fallbeispiel 1

Zieldimension	Gewichtung
Umsetzungsbezogene Ziele	0,082
Ökologische Ziele	0,343
Ökonomische Ziele	0,575

Für die Konsistenzbewertung der ermittelten Zielgewichtungen wird zunächst ein Konsistenzindex (KI) berechnet und dieser in Verhältnis zu einem in Tabelle 2 ersichtlichen Random Index (RI) gesetzt.

$$KW = \frac{KI}{RI} = \frac{0,03}{0,58} \leq 0,1 \quad (6.1)$$

Da der ermittelte Wert weit kleiner als der Zielwert von 0,1 ist, ist eine Konsistenz gegeben.

In einem weiteren Schritt sind die Gewichtungen der Zielgewichte festzulegen, welche eine Ebene unter den Zieldimensionen liegen. Bei den umsetzungsbezogenen Zielen sind dies die Risiken sowie der Umsetzungsaufwand. Den Risiken wird eine etwas größere Bedeutung (3) als dem Umsetzungsaufwand der Energieeffizienzmaßnahmen zugeordnet. Im Falle von zwei Zielen ergibt sich die Gewichtung direkt mit 1/4 für den Umsetzungsaufwand und 3/4 für Risiken.

Von Seiten des Unternehmens ist die Vermeidung von CO<sub>2</sub>-Emissionen bei der Auswahl der Energieeffizienzmaßnahmen gleichwertig mit der Energieeinsparung, weshalb bei der ökologischen Bewertung sowohl Energieeinsparung als auch CO<sub>2</sub>-Einsparung als Zielkriterium mit gleicher Gewichtung verwendet werden. In Summe ergibt sich die in Tabelle 26 dargestellte Zielgewichtung für das Fallbeispiel.

Tabelle 26: Zielgewichtungen im Fallbeispiel 1

Zieldimension	Zielkriterium	Zielgewichtung
Ökologische Ziele	Energieeinsparung	0,1715

	CO <sub>2</sub> -Einsparung	0,1715
Ökonomische Ziele	Kapitalwert	0,575
Umsetzungsbezogene Ziele	Risiken	0,062
	Umsetzungsaufwand	0,021

### 6.4.1.3. Risikobewertung

Die vom Unternehmen gesammelten Energieeffizienzmaßnahmen werden in einem weiteren Schritt auf ihre Risiken bewertet. Hierfür wurden die Energieeffizienzmaßnahmen zunächst nach Kategorien geclustert. Die Ergebnisse der fragebogenbasierten Risiko- und Aufwandsbewertung der Maßnahmen sind im Anhang ersichtlich. Vonseiten des Unternehmens als relevant werden Prozess-, Durchführungs- und Planungsrisiken betrachtet. Zunächst wurden die drei betrachteten Risiken bei den einzelnen Maßnahmenkategorien von drei Experten bewertet. Diese Einzelbewertungen wurden mithilfe des arithmetischen Mittels aggregiert und auf ein Intervall zwischen 0 und 1 transformiert. Die so gewonnenen Ergebnisse sind in Tabelle 27 ersichtlich.

Tabelle 27: Einzelrisikobewertung Fallbeispiel 1

Kategorie	Prozessrisiken	Durchführungsrisiken	Planungsrisiken
Beleuchtung	0	0	0,083
Druckluftsystem	0,25	0,25	0,083
Stand-by-Verbrauchsreduktion	0	0	0,083
Wärmesystem	0,5	0	0,167
Prozessoptimierung	0,083	0,417	0,333
Gebäudehülle	0	0	0,083
Motoren und Antriebe	0,667	0,583	0,5
Sonstige	0	0,25	0,25

In einem weiteren Schritt erfolgt die Anwendung von linguistischen Variablen, um das Gesamtrisiko der Maßnahmenkategorien zu bestimmen. Die hierfür verwendete Logik wurde gemeinsam mit dem Unternehmen festgelegt und ist im Anhang ersichtlich. Durch

Defuzzifizierung kann der Risikowert der betrachteten Maßnahmenkategorien gewonnen werden, der in Tabelle 28 ersichtlich ist.

Tabelle 28: Gesamtrisikobewertung Fallbeispiel 1

Maßnahmenkategorie	Risikowert
Beleuchtung	0,168
Druckluftsystem	0,334
Stand-by-Verbrauchsreduktion	0,168
Wärmesystem	0,282
Prozessoptimierung	0,447
Gebäudehülle	0,168
Motoren und Antriebe	0,599
Sonstige	0,334

Für die Bewertung des Umsetzungsaufwands wurde ebenfalls eine qualitative Bewertung der Maßnahmen auf Kategorienebene durchgeführt, deren Ergebnis im Anhang zu finden ist.

#### 6.4.1.4. Entscheidungsfindung

Für die Entscheidungsfindung werden neben den bewerteten Energieeffizienzmaßnahmen weitere notwendige Kontextfaktoren einbezogen. Hierbei wurde ein Diskontierungszins von 6 % in Absprache mit dem Unternehmen festgelegt.

Für den Energieträger Strom wird laut einer Studie des Umweltbundesamts eine Preisentwicklung von etwa 4 % pro Jahr bezogen auf das Ausgangsjahr 2015 bis zum Jahr 2050 erwartet (Nicolosi et al. 2021, S. 131). Um im Rahmen der Simulation auch extreme Entwicklungen zu berücksichtigen, wird von jährlichen Preissteigerungen von minimal 0 % und maximal 6 % ausgegangen. Grundlage für die Festlegung der Preissteigerungen des Energieträgers Gas ist eine Studie im Auftrag der EU-Kommission. In verschiedenen Szenarien wird hierbei ein jährlicher Anstieg des Gaspreises von etwas mehr als 2 % pro Jahr zwischen den Betrachtungsjahren 2015 und 2050 erwartet (Duić

et al. 2015). Um hier ebenfalls Extremwertszenarien abzubilden, wird die betrachtete maximale jährliche Preissteigerung auf 3 % festgelegt, der minimale Wert auf 0 %.

Zentrales Element der Entscheidungsfindung sind optimale Investitionspläne für Energieeffizienzmaßnahmen. Hierfür wurde in Abbildung 54 die maximale Investitionshöhe als Nebenbedingung des Entscheidungsmodells in Schritten von 50.000 Euro bis zu einer Höhe von 3,5 Millionen Euro erhöht.

Es zeigt sich ein tendenziell mit der Investitionshöhe steigender Kapitalwert sowie eine steigende erzielbare Energie- und CO<sub>2</sub>-Einsparung. Aufgrund der gewählten Zielgewichtung, bei der den ökonomischen Zielkriterien eine höhere Bedeutung als den ökologischen zugeordnet wurde, ist dies jedoch nicht für alle Datenpunkte gültig. So zeigt sich im Bereich zwischen 1,5 und 2 Millionen Euro eine zwischenzeitliche Reduktion der erzielbaren Energieeinsparung, da die Maximierung des Kapitalwerts höher als die der Energieeinsparung gewichtet ist. Beim Kapitalwert zeigt sich zudem eine hohe Spannbreite bei den Simulationsergebnissen.

Weiteres Betrachtungskriterium ist das Risiko des Investitionsprogramms. Es zeigt sich, dass das maximale Einzelrisiko keine hohe Varianz aufweist. Entsprechend ist bei den unterschiedlichen Investitionsprogrammen nicht von großen Unterschieden bei den Einzelrisiken auszugehen, sondern verstärkt die Risikosumme ausschlaggebend.

Für die weitere Entscheidungsfindung der Investitionsprogramme wurde statische Amortisationszeit in Abhängigkeit der maximalen Investitionshöhe aufgetragen. Hier zeigt sich zunächst ein praktisch linearer Anstieg der Amortisationszeiten bis zu einem Wert von etwa 3,2 Jahren. Da bei einer gegebenen Investitionshöhe tendenziell in allen Bewertungskriterien optimale Energieeffizienzmaßnahmen vom Algorithmus in das Investitionsprogramm aufgenommen werden, müssen bei zunehmender Höhe immer größere Anteile der verfügbaren Energieeffizienzmaßnahmen einbezogen werden, sofern diese noch die Ausprägung der Zielfunktion verbessern.

Entsprechend konvergiert der Algorithmus bei steigenden Investitionshöhen gegen den Mittelwert der Amortisationszeit der verfügbaren Maßnahmen und verschlechtert sich



---

zunehmend, da auch in ihrer Ausprägung schlechtere Energieeffizienzmaßnahmen in das Investitionsprogramm aufgenommen werden.

Aus Sicht des Entscheidungsträgers kann mithilfe der Abbildung in Abhängigkeit der verfügbaren Investitionsmittel das optimale Investitionsprogramm für Energieeffizienzmaßnahmen ermittelt werden.

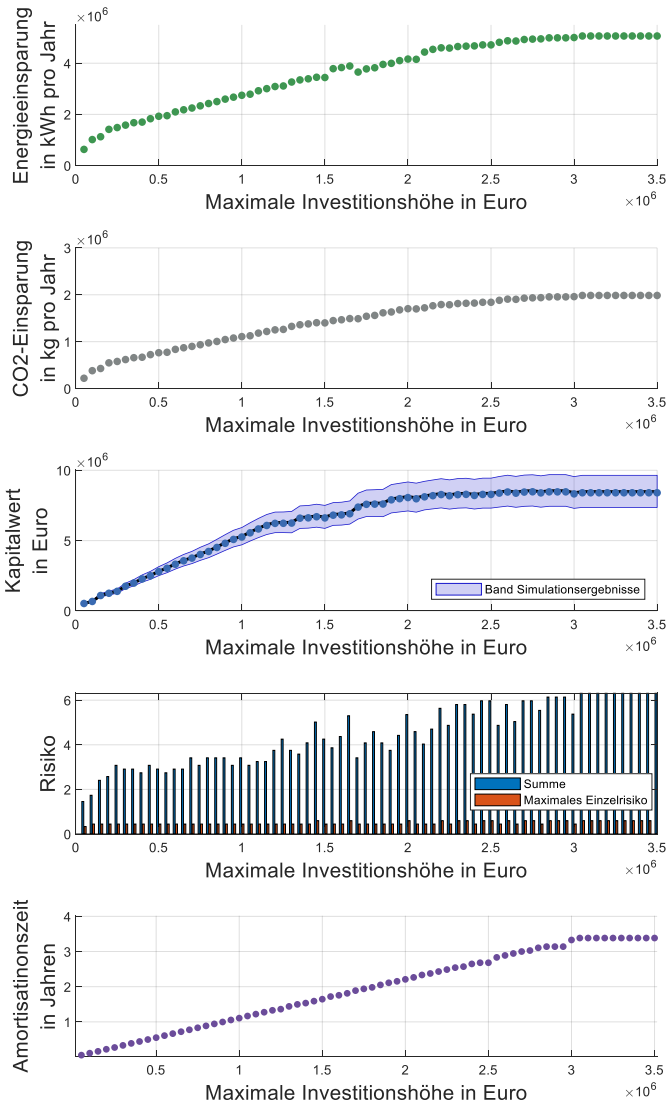


Abbildung 54: Entscheidungsvorlage Fallbeispiel 1

Als Referenzwert für die weitere Betrachtung wird eine Investitionshöhe von maximal 1,5 Millionen Euro festgelegt und eine Abweichung von 20% um diese Höhe betrachtet. Bei den Zielkriterien zeigt sich, dass eine Reduktion der maximalen Investitionshöhe um 20 % mit einer Reduktion der Zielkriterien um jeweils etwas weniger als 10 % einhergeht. Auf der anderen Seite geht eine Erhöhung der Investitionshöhe von 20 % mit einer höheren Zielerreichung von jeweils nur mehr als 10 % einher. Ausnahme ist die Energieeinsparung bei der eine Erhöhung der maximalen Investitionshöhe um 5 %, bzw. 10%, mit einer überproportionalen Erhöhung einhergeht (vgl. Abbildung 55).

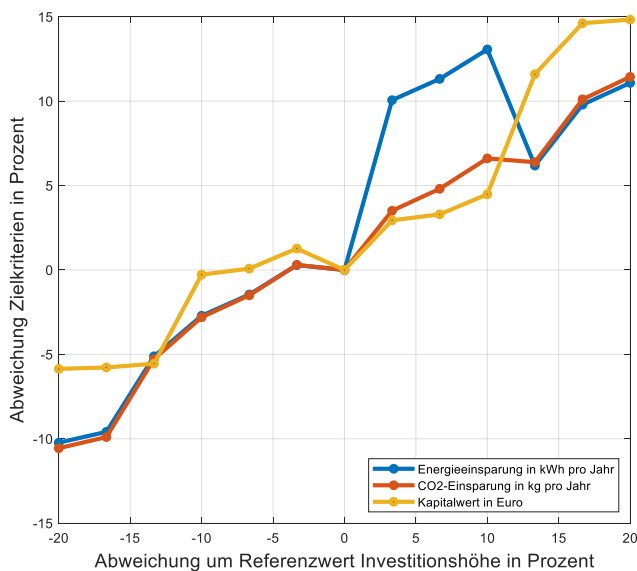


Abbildung 55: Abweichung um Referenzwert 1,5 Millionen Euro (ohne Nebenbedingung)

Aus Sicht des Entscheiders zeigt sich, dass bei einer präferierten Energieeinsparung eine leichte Erhöhung der Investitionshöhe angestrebt werden könnte. Auf der anderen Seite zeigt sich ebenso, dass eine Reduktion mit einer vergleichsweise geringen Reduktion der Zielkriterien einhergeht. Tabelle 29 fasst die zuvor visuell dargestellte Analyse zusammen.

Tabelle 29: Abweichung um Referenzwert 1,5 Millionen Euro (keine Nebenbedingung)

Abweichung Investitionshöhe	Abweichung Energieeinsparung	Abweichung CO2- Einsparung	Abweichung Kapitalwert
-20 %	-10,23 %	-10,56 %	-5,86 %
-10 %	-2,712 %	-2,8 %	-5,55 %
0 %	0 %	0 %	0 %
10 %	13,06 %	6,6 %	4,48 %
20 %	11,08 %	11,44 %	14,83 %

Aufgrund des hohen Grads an Internationalisierung stellt sich für das Unternehmen die Frage nach der regionalen Verteilung der Energieeffizienzmaßnahmen in den optimalen Investitionsbündeln. Nachfolgend wurde deshalb für unterschiedliche Investitionshöhen die regionale Verteilung ermittelt. Hierfür wurde eine Clusterung verwendet, die vor allem durch die Bedeutung der einzelnen Länder und Kontinente für das Unternehmen begründet ist. Für die Ermittlung der Anteile wurde der prozentuale Anteil der Energieeffizienzmaßnahmen einer bestimmten Region in den optimalen Investitionsplänen ermittelt.

Durch die Motivation der Fragestellung, die auch in der Auslastung einzelner regionaler Fachabteilungen begründet ist, wurde hierfür explizit die Anzahl der Maßnahmen und nicht der prozentuale Anteil der Energieeinsparung nach Region betrachtet. Tabelle 30 stellt die Ergebnisse dieser Fragestellung dar. Es zeigt sich ein sehr hoher Anteil an Energieeffizienzmaßnahmen, welche in Deutschland verortet sind. Der minimale Anteil an Maßnahmen in Deutschland liegt bei 21 %, der maximale Anteil bei 34 %. Keine andere Region weist eine ähnlich hohe Konzentration auf. Hervorzuheben ist jedoch, dass der geringe Anteil an Maßnahmen in Afrika und Südamerika vor allem durch die geringen verfügbaren Maßnahmen in diesen Regionen begründet liegt.

Tabelle 30: Anteil der ausgewählten Energieeffizienzmaßnahmen nach Regionen

Maximale Investitionshöhe	Afrika	Asien	Deutschland	Nordamerika	Rest Europa	Südamerika
250.000 €	0 %	22 %	33 %	17 %	17 %	11 %
500.000 €	6 %	18 %	29 %	18 %	18 %	12 %
750.000 €	6 %	17 %	33 %	17 %	17 %	11 %
1.000.000 €	5 %	14 %	27 %	23 %	23 %	9 %
1.250.000 €	7 %	15 %	26 %	22 %	22 %	7 %
1.500.000 €	8 %	21 %	21 %	21 %	21 %	8 %
1.750.000 €	8 %	12 %	27 %	23 %	23 %	8 %
2.000.000 €	7 %	14 %	31 %	21 %	21 %	7 %
2.250.000 €	6 %	15 %	30 %	21 %	21 %	6 %
2.500.000 €	6 %	16 %	34 %	19 %	19 %	6 %
2.750.000 €	6 %	15 %	32 %	21 %	21 %	6 %
3.000.000 €	0 %	22 %	33 %	17 %	17 %	11 %

Aus Sicht des Unternehmens ist eine zu hohe Konzentration der Maßnahmen in einer einzelnen Region nicht gewünscht, da hierdurch die Risikominimierung durch Energieeffizienzmaßnahmen bei Energiepreisteigerungen auf einzelne Regionen konzentriert ist. Aufgrund dessen wurde eine Nebenbedingung in der Optimierung ergänzt, bei der der Anteil Deutschlands auf maximal 20 % der Energieeffizienzmaßnahmen begrenzt ist. Dies wurde durch eine lineare Nebenbedingung implementiert. Bei der Verwendung der so beschriebenen Nebenbedingung zeigt sich ein abweichender Verlauf im Vergleich zu Abbildung 55. Ergebnisse der so durchgeführten Optimierung sind in Abbildung 56 ersichtlich. So ist die erzielbare Energieeinsparung pro Jahr durch die Begrenzung auf einen maximalen Anteil der Energieeffizienzmaßnahmen in Deutschland erwartungsgemäß etwas geringer.

Es kann gefolgert werden, dass tendenziell Maßnahmen in der Region Deutschland vorhanden sind, welche durch die Begrenzung nicht vollumfänglich umgesetzt werden können. Aus Sicht des Unternehmens kann es jedoch aus Gründen der regionalen Streuung dennoch angebracht sein, eine regionale Begrenzung in das Entscheidungsmodell einzubeziehen.

In Bezug auf die Amortisationszeiten der Investitionsprogramme zeigt sich ebenfalls Abweichung im Vergleich zu einer fehlenden regionalen Begrenzung, da diese bereits früher gegen einen Endwert konvergiert.

Bei den Risiken zeigt sich ein leichter Anstieg der maximalen Einzelrisiken ab etwa 2,4 Millionen Euro Investitionshöhe, wobei hier gleichzeitig die maximale Summe der Risiken erreicht wird.

Aus Sicht des Unternehmens kann grundsätzlich geschlossen werden, dass die Auswirkungen einer regionalen Begrenzung keine zu großen Unterschiede bewirkt. Im Einzelnen können zudem die erzielbaren Ergebnisse bestimmter Investitionsprogramme verglichen und hierdurch eine Abwägung getroffen werden.

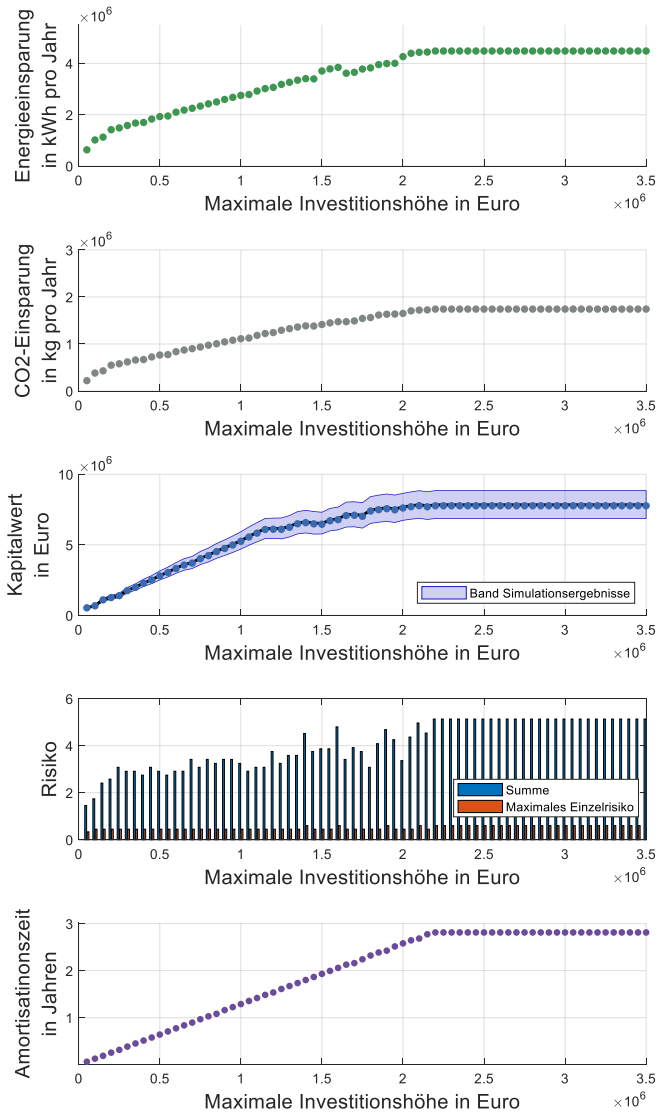


Abbildung 56: Entscheidungsvorlage mit begrenztem Anteil Deutschland

Als Referenzwert für die weitere Betrachtung wird ebenfalls eine Investitionshöhe von maximal 1,5 Millionen Euro festgelegt und eine Abweichung von 20 % um diese Höhe betrachtet. Bei den Zielkriterien zeigt sich im Vergleich zur Analyse ohne Nebenbedingung eine höhere Abweichung bei der Energieeinsparung, bei der eine Reduktion der maximalen Investitionshöhe um 20 % mit einer Reduktion um etwa 17 % einhergeht. Auf der anderen Seite geht eine Erhöhung der Investitionshöhe von 20 % mit einer höheren Zielerreichung von weniger als 5 % bei der Energieeinsparung einher. (vgl. Abbildung 57)

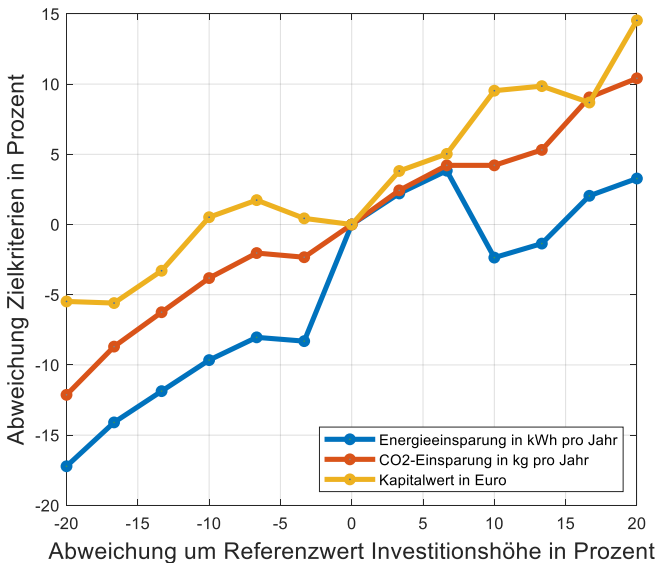


Abbildung 57: Abweichungen um Referenzwert 1,5 Millionen Euro (inkl. Nebenbedingung)

Aus Sicht des Entscheiders zeigt sich, dass bei einer präferierten Energieeinsparung eine leichte Erhöhung der Investitionshöhe angestrebt werden könnte, bei der Zielkriterien annähernd proportional steigen. Tabelle 31 fasst die zuvor visuell dargestellte Analyse zusammen.



Tabelle 31: Abweichung um Referenzwert 1,5 Millionen Euro (keine Nebenbedingung)

Abweichung Investitionshöhe	Abweichung Energieeinsparung	Abweichung CO2- Einsparung	Abweichung Kapitalwert
-20 %	-17,22 %	-12,13 %	-5,47 %
-10 %	-9,66 %	-3,81 %	0,52 %
0 %	0 %	0 %	0 %
10 %	-2,35 %	4,21 %	9,52 %
20 %	3,27 %	10,41 %	14,53 %

Für die weitere Untersuchung der Entscheidungsfindung wurde der Diskontierungszins im Rahmen der in Abbildung 58 dargestellten Ergebnisse von 0 bis 6 % variiert. Darüber hinaus wurden drei unterschiedliche Investitionshöhen betrachtet, welche farblich codiert dargestellt sind. Aufgrund der teilweise sehr langen Nutzungsdauern der Energieeffizienzmaßnahmen von bis zu 35 Jahren innerhalb der betrachteten Maßnahmen zeigt sich ein hoher Einfluss des Diskontierungszinses auf den erzielbaren Kapitalwert. Bei zunehmender Diskontierung fließen zukünftige Zahlungsströme immer stärker diskontiert in die Kapitalwertberechnung ein und senken dadurch den erzielbaren Kapitalwert.

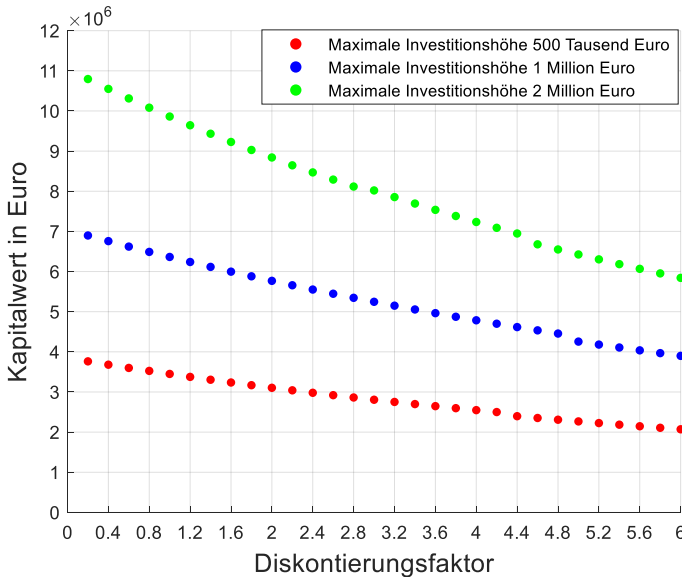


Abbildung 58: Variation Diskontierungszins bei verschiedenen Investitionshöhen

#### 6.4.1.5. Entscheidungsanalyse

Mithilfe der Monte-Carlo-Simulation werden über die individuelle Nutzungsdauer der Energieeffizienzmaßnahmen des betrachteten Investitionsprogramms mögliche Energiepreisentwicklungen sowie Abweichungen von der Investitionshöhe und der jährlichen Energieeinsparung untersucht. Jeder Simulationslauf stellt ein mögliches Entwicklungsszenario dar. Zu beachten ist, dass durch die unterschiedliche Nutzungsdauer der Maßnahmen der maximale Betrachtungshorizont der Monte-Carlo-Simulation der maximalen Nutzungsdauer der enthaltenen Energieeffizienzmaßnahmen des Investitionsplans entspricht. Die Durchführung der Simulation basiert auf der Festlegung der Verteilung der betrachteten Eingangsgrößen. Innerhalb der Simulation ergeben sich so für jeden Simulationslauf energieträger- und jahresspezifische Preisentwicklungen.

### Simulationsgrößen

Neben den zuvor bereits eingeführten Szenarien für Energiepreissteigerungen werden ergänzend Abweichungen bei der Investitionshöhe betrachtet. Basierend auf Erfahrungswerten wurden eine minimale Abweichung von 0 % und eine maximale Abweichung von 10 % bezogen auf die erwartete Investitionshöhe festgelegt. Zudem werden Abweichungen bei der geplanten jährlichen Energieeinsparung betrachtet. Hier werden Abweichungen in beide Richtungen von je 5 % festgelegt, da die jährlichen Energieeinsparungen aufgrund von Erfahrungswerten auch positiver als erwartet ausfallen können. Bei allen Simulationsgrößen wird von einer Gleichverteilung ausgegangen, die durch Minimal- und Maximalwert festgelegt wird. Tabelle 32 fasst die Eingangswerte der Monte-Carlo-Simulation zusammen.

Tabelle 32: Verwendete Eingangswerte für die Monte-Carlo-Simulation

Energieträger	Minimale Preissteigerung pro Jahr	Maximale Preissteigerung pro Jahr
Strom	0 %	6 %
Gas	0 %	3 %
	Minimale prozentuale Abweichung	Maximale prozentuale Abweichung
Investitionshöhe	0 %	10 %
Energieeinsparung	-5 %	5 %

Für die Ermittlung der Ergebnisse wurde je eine Monte-Carlo-Simulation mit 1000 Simulationsläufen bei einer Variation der Eingangsparameter durchgeführt. Der betrachtete Investitionsplan beinhaltet die zuvor einbezogene Begrenzung auf einen Anteil von maximal 20 % der ausgewählten Maßnahmen in der Region Deutschland und eine maximale Investitionshöhe von 1,5 Millionen Euro.

Die Ergebnisse der Simulation sind in Abbildung 59 für den betrachteten Investitionsplan ersichtlich. Neben dem Kapitalwert des Investitionsprogramms werden die jahresspezifischen diskontierten Zahlungsströme in Abhängigkeit der betrachteten

Simulationsgrößen ermittelt. Die Ergebnisse zeigen die Spannweite der erwarteten jahresspezifischen Kapitalwerte des betrachteten Investitionsprogramms. Die beobachteten jahresspezifischen Veränderungen lassen sich auf verschiedene Eigenschaften zurückführen. So führt der Diskontierungszins zu einer stetig weiteren Abzinsung der Kapitalwerte über die Jahre. Aufgrund der individuellen Nutzungsdauer der Energieeffizienzmaßnahmen ergibt sich im Einzelnen ein sprunghafter Abfall der Zahlungsströme, sobald deren Nutzungsdauer ausläuft. Dies ist besonders ausgeprägt nach 15 Jahren, da für einen großen Teil der Maßnahmen ebendiese Nutzungsdauer festgelegt ist. Auf der anderen Seite stehen Energiepreissteigerungen, durch die die monetären Einspareffekte verstärkt werden.

Bei den Kennwerten des betrachteten Investitionsprogramms zeigt sich ein Mittelwert von 6,66 Millionen Euro beim Kapitalwert, dessen 95 %-Intervall zwischen 6,06 und 7,26 Millionen Euro liegt. Beim 5 %-Quantil ergibt sich ein Wert von 6,19 Millionen Euro, was bedeutet, dass in 95 % der Fälle ein höherer Kapitalwert zu erwarten ist.

Durch das Ende der Nutzungsphase eines großen Teils der Maßnahmen nach 15 Jahren reduziert sich die Streuung der Simulationsergebnisse. Ebenso wird mit zunehmendem Betrachtungsjahr der Diskontierungseffekt immer stärker, da Zahlungen proportional zu  $1/d^n$  abgezinst werden, wobei  $d$  der Diskontierungszins und  $n$  das Betrachtungsjahr ist. Durch das Zusammenspiel der verschiedenen Effekte ergibt sich das in Abbildung 59 dargestellte Ergebnis.

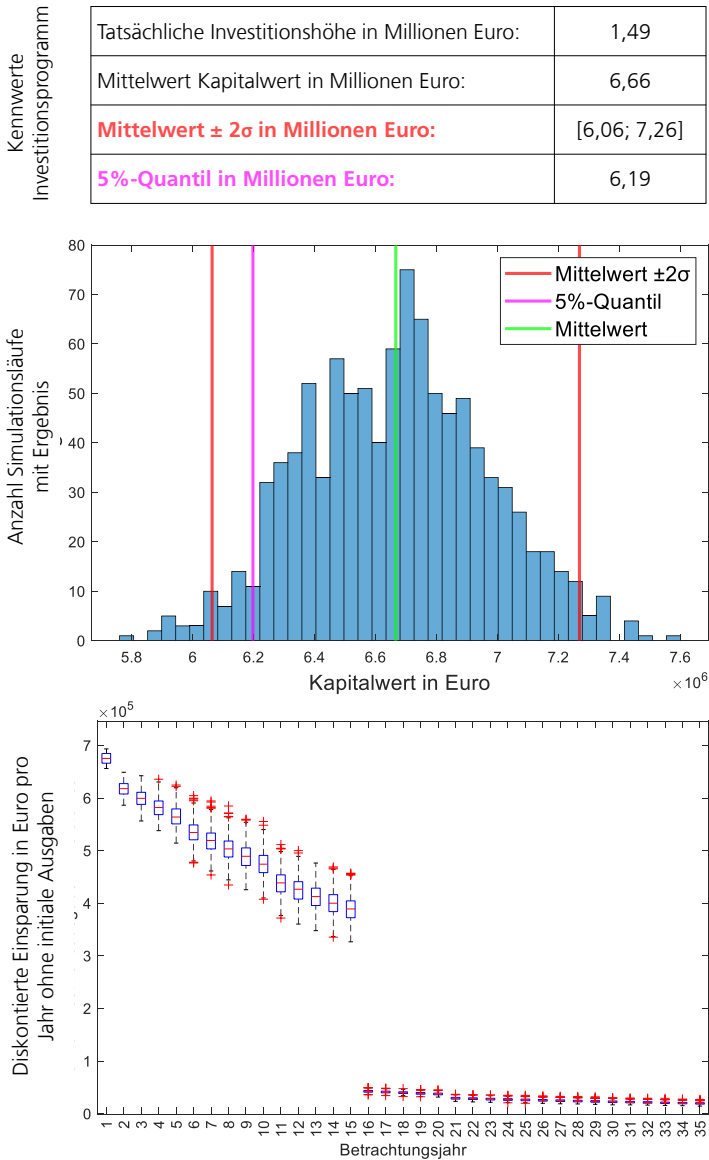


Abbildung 59: Entscheidungsanalyse Fallbeispiel 1

Die zuvor durchgeführte Monte-Carlo-Simulation unterstützt bei der besseren Interpretation des ermittelten optimalen Investitionsplans. Zu beachten ist, dass im Betrachtungsraum der Energieeffizienzmaßnahmen hohe Energiepreise für den Kapitalwert des Investitionsprogramms von Vorteil sind, auch wenn diese auf Ebene des Gesamtunternehmens zu Kostensteigerungen führen könnten.

### **Regionale Differenzierung**

Aufgrund der regionalen Verteilung der Energieeffizienzmaßnahmen ist für das Unternehmen der Einfluss von regionalen Energiepreisveränderungen von Bedeutung. Um deren Einfluss zu analysieren, werden mithilfe der Monte-Carlo-Simulation regionenspezifische Energiepreisveränderungen für relevante Unternehmensstandorte durchgeführt. Die regionale Differenzierung erfolgt auf Ebene von verschiedenen Regionen-Clustern, die nach Bedeutung für das Unternehmen einzelne Länder wie Deutschland oder auch Kontinente umfassen.

Da die Festlegung der Gewichtung zwischen regionalen und globalen Einflüssen entscheidenden Einfluss auf die Ergebnisse hat, deren Festlegung jedoch mit sehr hohen Unsicherheiten behaftet ist, werden verschiedene Szenarien betrachtet. Es folgt zunächst die genaue Vorstellung von Szenario 1 (vgl. Tabelle 33), im Anschluss werden die Ergebnisse der verschiedenen Szenarien im Vergleich dargestellt.

Im Szenario 1 erfolgt die Festlegung der globalen Entwicklung analog zu der zuvor durchgeführten Monte-Carlo-Simulation. Unterschied ist jedoch, dass es in den einzelnen Regionen zu individuellen Abweichungen kommen kann.

Zu beachten ist, dass es sich um eine additive Komposition der Effekte handelt. So führt eine globale Veränderung von 5 % und eine lokale Veränderung von 3 % entsprechend zu einer Veränderung von 8 % im Betrachtungsjahr in der betrachteten Region.

Tabelle 33: Modellparameter für regionenspezifische Energiepreisentwicklung (Szenario 1)

Energieträger	Minimale Preissteigerung pro Jahr	Maximale Preissteigerung pro Jahr
Strom (global):	0 %	6 %
Gas (global):	0 %	3 %
Strom (regional):	-8 %	8 %
Gas (regional):	-5 %	5 %

Die Ergebnisse der so durchgeführten Simulation finden sich in Abbildung 60. Die Unterschiede zu einer Betrachtung ohne regionenspezifische Differenzierung zeigen sich vor allem in der Zunahme der Extremwerte auf beiden Seiten des Mittelwerts. Aufgrund der asymmetrisch betrachteten regionalen Einflüsse können sich in einzelnen Simulationsläufen extreme Entwicklungen in einzelnen Regionen zeigen.

Noch stärker zeigen sich die Einflüsse der regionalen Energiepreisentwicklung bei einer jahresspezifischen Betrachtung. Die Varianz der Zahlungsströme ist hier immens erhöht.

Die erhöhte Varianz der Simulationsläufe zeigt sich auf dieser Betrachtungsebene noch weitaus deutlicher. In Abhängigkeit der einzelnen Simulationsläufe lässt sich insbesondere zwischen den Betrachtungsjahren 2 und 15 eine hohe Varianz beobachten. Diese ist durch den noch geringen Dämpfungseffekt der Diskontierung sowie die noch aktive Nutzungsphase aller Maßnahmen erklärbar.

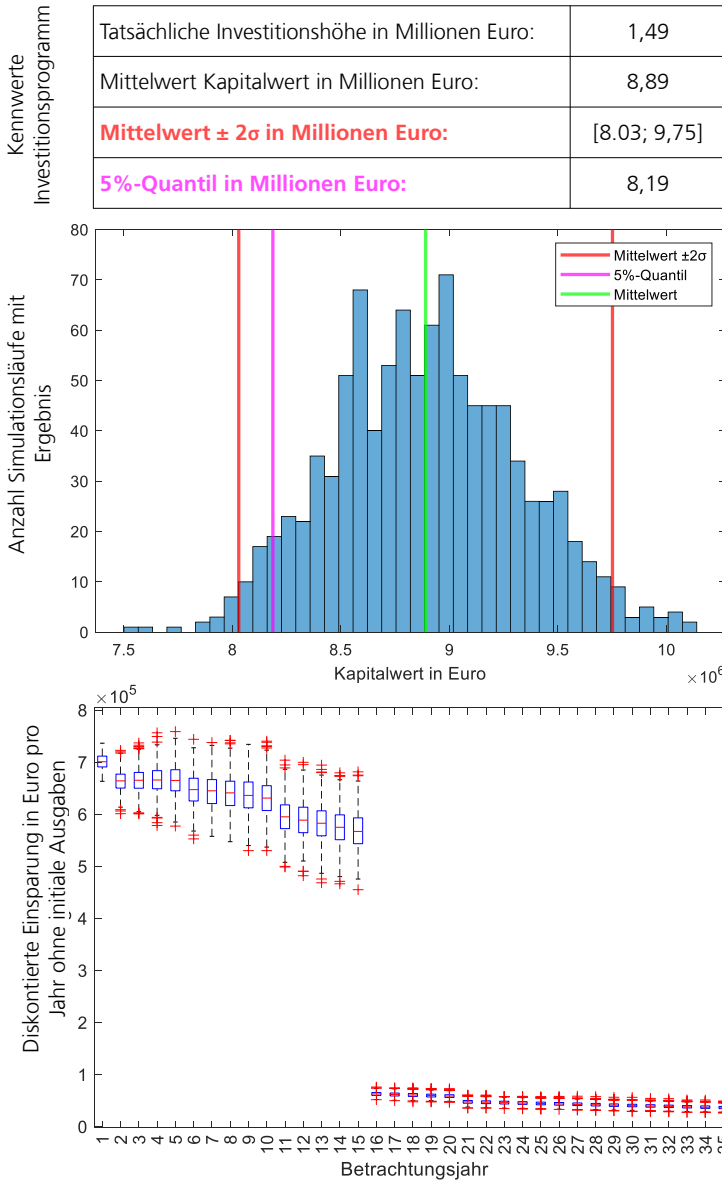


Abbildung 60: Entscheidungsanalyse regionale Differenzierung



Der Nutzen der zuvor vorgestellten Betrachtung ergibt sich neben der erhöhten Transparenz für die Auswirkungen von Extremwertentwicklungen vor allem durch die Möglichkeit der Einbeziehung in das Risikomanagement des Unternehmens. So kann die vorgestellte Simulation als ein Baustein neben der Struktur der Energiekosten des Unternehmens in Abhängigkeit von Energiepreissteigerungen genutzt werden, um den Einfluss auf die Risikoreduktion durch Energieeffizienzmaßnahmen zu bestimmen.

Aus Unternehmenssicht kann sich zudem anbieten, die Ergebnisse in ein allgemeines Risikomanagement aufzunehmen, in dem auch die grundlegenden Strukturen der relevanten Energiepreise und etwa auch deren Absicherung über Hedgingmaßnahmen berücksichtigt sind. Hierdurch kann ein umfängliches Risikomanagement-Tool entwickelt werden, anhand dessen die Auswirkungen von Energiepreissteigerungen auf das Unternehmen quantifiziert werden können. Ebenso kann einbezogen werden, inwieweit das Investitionsprogramm auf die Reduktion der Gesamtenergiekosten Einfluss hat.

Für die Analyse wurden weitere Szenarien definiert, die in Tabelle 34 ersichtlich sind. Neben dem bereits vorgestellten ersten Szenario werden in Szenario 2 und 3 vor allem positive Abweichungen der Energiepreisentwicklungen betrachtet, d.h. eine regionale stärkere Zunahme von Energiepreisen. Zudem handelt es sich um asymmetrische Szenarien. Im letzten betrachteten Szenario 4 handelt es sich um ein ergänztes Szenario 1, bei dem die Höhe der negativen Energiepreisentwicklungen in den Regionen begrenzt wurde.

Tabelle 34: Szenario-Analyse der regionenspezifischen Entwicklung

Energieträger	Minimale Preissteigerung pro Jahr	Maximale Preissteigerung pro Jahr
<b>Szenario 1</b>		
Strom (regional):	-8 %	8 %
Gas (regional):	-5 %	5 %
<b>Szenario 2</b>		
Strom (regional):	0 %	8 %
Gas (regional):	0 %	5 %
<b>Szenario 3</b>		
Strom (regional):	0 %	10 %
Gas (regional):	0 %	5 %
<b>Szenario 4</b>		
Strom (regional):	-4 %	8 %
Gas (regional):	-2,5 %	5 %

Abbildung 61 fasst die Ergebnisse der betrachteten Szenarien auf Ebene einzelner Boxplots zusammen. In Boxplots sind jeweils die Ergebnisse der Simulationsläufe der jeweiligen Szenarien dargestellt.

Es zeigt sich erwartungsgemäß, dass die Begrenzung der Energiepreissteigerungen auf positive Werte in den Szenarien 2 und 3 zu einem höheren Kapitalwert aufgrund der Einbeziehung der monetären Einsparungen in die Kapitalwertberechnung führt.

Hier bietet sich in einem weiteren Schritt für das Unternehmen ebenfalls eine Integration in ein höheres Risikomanagement an, bei dem Mehrkosten durch Energiepreissteigerungen berücksichtigt werden.

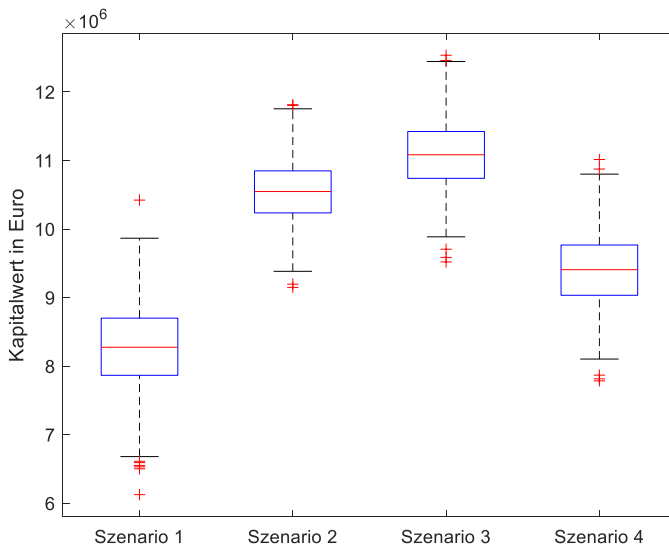


Abbildung 61: Boxplots Monte-Carlo-Simulationen Szenarien 1–4 (je  $n=1000$ )

#### 6.4.1.6. Zwischenfazit

Im Rahmen der Entscheidungsermittlung wurden für die betrachteten Energieeffizienzmaßnahmen und die gewählte Gewichtung der Zieldimensionen optimale Investitionspläne in Abhängigkeit der verfügbaren Investitionshöhe ermittelt. Aufgrund des beobachteten hohen Anteils an Energieeffizienzmaßnahmen in der Region Deutschland wurde im weiteren Verlauf der Anteil der Region begrenzt.

Durch die Entscheidungsanalyse konnte das Verhalten der betrachteten Investitionspläne bei Variation der relevanten wirtschaftlichen Parameter analysiert werden. Hierbei wurde als zentrales Entscheidungskriterium das 5 %-Quantil betrachtet, welches so interpretiert werden kann, dass in 95 % der Simulationsläufe höhere Kapitalwerte erzielt wurden.

Somit wurde ein Kriterium für die Risikobewertung im Anschluss an die Monte-Carlo-Simulation eingeführt.

Für das Unternehmen ergibt sich durch die präsentierte Entscheidungsunterstützung eine valide Grundlage, auf der über optimale Investitionspläne entschieden werden kann.

#### 6.4.2. Fallbeispiel 2

Im zweiten Fallbeispiel wird ein Technologiekonzern mit diversifiziertem Produktportfolio betrachtet, welcher der Maschinenbaubranche zugeordnet wird. Das Unternehmen verfolgt Energie- und Klimaziele, bei denen für die Energieeffizienz der Standorte konkrete Zielvorgaben existieren. Entsprechend sollen mit der Anwendung des Entscheidungsmodells optimale Investitionsprogramme bestimmt werden, um diese Ziele zu erreichen.

Konkrete Zielsetzung ist die Bestimmung von optimalen Investitionsplänen für bestimmte jährliche Energieeinsparungen. Es soll eine Entscheidungsvorlage ermittelt werden, welche die Höhe der notwendigen Investitionshöhen sowie die Amortisationszeit der Investitionspläne beinhaltet.

Besonderes Augenmerk soll zudem auf verschiedene Maßnahmenkategorien gelegt werden, da das Unternehmen verstärkt Maßnahmen aus dem Wärmebereich priorisieren möchte.

##### 6.4.2.1. Energieeffizienzmaßnahmen

Vom Unternehmen wurden von den deutschlandweiten Standorten Energieeffizienzmaßnahmen gesammelt und diese in einer Datenbank aufbereitet. Entsprechend liegen die Energieeffizienzmaßnahmen in bereits zuvor bewerteter Form vor. Die gesammelten Maßnahmen erhalten alle Daten des Bewertungsmodells für Energieeffizienzmaßnahmen mit Ausnahme der Risiko- und Aufwandsbewertung. Diese wurde in einem weiteren Schritt durchgeführt, wobei Energieeffizienzmaßnahmen zuvor wie in Fallbeispiel 1 nach Kategorien geclustert wurden. Die vom Unternehmen übergebenen Energieeffizienzmaßnahmen wurden zunächst auf ihre Plausibilität überprüft und um Maßnahmen bereinigt, bei denen auch auf Nachfrage notwendige

Bewertungskriterien nicht vorhanden waren, etwa für die Berechnung des Kapitalwerts notwendige Investitionshöhen sowie jährliche Kosten- oder Energieeinsparungen.

Die betrachteten Energieeffizienzmaßnahmen umfassen ein breites Maßnahmenpektrum aus den Bereichen Bedarfsmanagement, Beleuchtung, Gebäudehülle, Kühlsysteme, Lüftungsanlagen, Motoren und Antriebe, Pumpensysteme, Prozessoptimierung sowie Wärmeversorgung (vgl. Tabelle 35). Eine regionale Differenzierung ist nicht gegeben, da sich alle Maßnahmen auf Standorte in Deutschland beziehen.

Insgesamt werden im Rahmen des Fallbeispiels 38 Energieeffizienzmaßnahmen betrachtet. Besonderheit ist ein einzelnes Energieeffizienzprojekt, dessen Investitionshöhe die Summe aller weiteren Maßnahmen übersteigt und entsprechend einen hohen Einfluss auf das Investitionsprogramm besitzt. Eine spezifische Darstellung der bewerteten Maßnahmen ist aufgrund einer Geheimhaltungsvereinbarung mit dem Unternehmen nicht möglich, weshalb im nachfolgenden die Ergebnisse im Rahmen der Entscheidungsfindung und –analyse betrachtet werden.

Tabelle 35: Betrachtete Maßnahmen Fallbeispiel 2

Maßnahmenkategorie	Anzahl
Beleuchtung	19
Bedarfsmanagement	1
Lüftungsanlagen	2
Prozessoptimierung	1
Wärmeversorgung	5
Motoren und Antriebe	2
Pumpensysteme	2
Kühlsysteme	1
Gebäudehülle	3
Sonstige	2

Wechselwirkungen zwischen Maßnahmen wurden vom Unternehmen ähnliche wie in Fallbeispiel 1 nicht gefunden, wodurch diese im weiteren Verlauf nicht einbezogen werden.

Da von Seiten des Unternehmens eine Bewertung der CO<sub>2</sub>-Einsparungen nicht durchgeführt wurde, werden Emissionsfaktoren basierend auf nachfolgenden Quellen verwendet. Für die Emissionen des Energieträgers Strom werden Emissionsfaktoren des Umweltbundesamts basierend auf dem Strommix in Deutschland des Jahres 2021 verwendet, bei denen 0,420 kgCO<sub>2</sub>/kWh genannt werden (Umweltbundesamt 2022b). Für den Emissionswert des Energieträgers Erdgas werden Daten des Bundesamts für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle verwendet, die den CO<sub>2</sub>-Faktor für Erdgas mit 0,201 kgCO<sub>2</sub>/kWh beziffern (Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle 2022).

#### 6.4.2.2. Zielgewichtung

Die Ermittlung der Zielgewichtungen erfolgt durch paarweise Vergleiche mithilfe des analytischen Hierarchieprozesses. Ergebnisse des Vergleichs sind in Tabelle 36 ersichtlich.

Tabelle 36: Paarweiser Vergleich Fallbeispiel 2

	Umsetzungsbezogene Ziele	Ökologische Ziele	Ökonomische Ziele
Umsetzungsbezogene Ziele	1	1/5	1/5
Ökologische Ziele	5	1	1
Ökonomische Ziele	5	1	1

Den ökologischen als auch den ökonomischen Zielen wird eine erheblich höhere Bedeutung (5) als den umsetzungsbezogenen Zielen zugewiesen. Zudem wird den ökonomischen Zielen dieselbe Bedeutung wie den ökologischen Zielen zugeordnet.

Durch Verwendung der Eigenwertmethode wird der Vektor der Zielgewichte ermittelt, der in Tabelle 37 dargestellt ist.

Tabelle 37: Zielgewichtung Fallbeispiel 2

Zieldimension	Gewichtung
Umsetzungsbezogene Ziele	0,091
Ökologische Ziele	0,455
Ökonomische Ziele	0,455

Für die Konsistenzbewertung der ermittelten Zielgewichtungen wird analog des vorgestellten Vorgehens zunächst ein Konsistenzindex (KI) berechnet und dieser in Verhältnis zu einem in Tabelle 2 ersichtlichen Random Index (RI) gesetzt.

$$KW = \frac{KI}{RI} = \frac{0}{0,58} \leq 0,1 \quad (6.1)$$

Da der ermittelte Wert weit kleiner als der Zielwert von 0,1 ist, ist eine Konsistenz gegeben. Neben der Festlegung der Zieldimensionen sind in einem weiteren Schritt die untergeordneten Zielgewichte festzulegen. Bei den umsetzungsbezogenen Zielen sind dies Risiken sowie Umsetzungsaufwand.

Die Risiken werden in einem Zwischenschritt (2) mit etwas größerer Bedeutung als der Umsetzungsaufwand der Energieeffizienzmaßnahmen bewertet. Im Falle von zwei Zielen ergibt sich die Gewichtung direkt mit 1/3 für den Umsetzungsaufwand und 2/3 für Risiken.

Von Seiten des Unternehmens ist die Vermeidung von CO<sub>2</sub>-Emissionen bei der Auswahl der Energieeffizienzmaßnahmen gleichwertig mit der Energieeinsparung, weshalb bei der ökologischen Bewertung sowohl Energieeinsparung als auch CO<sub>2</sub>-Einsparung als Zielkriterium verwendet werden. In Summe ergibt sich die in Tabelle 38 dargestellte Zielgewichtung für das Fallbeispiel.

Tabelle 38: Zielgewichtungen Fallbeispiel 2

Zieldimension	Zielkriterium	Zielgewichtung
Ökologische Ziele	Energieeinsparung	0,2275
	CO <sub>2</sub> -Einsparung	0,2275
Ökonomische Ziele	Kapitalwert	0,455
Umsetzungsbezogene Ziele	Risiken	0,06
	Umsetzungsaufwand	0,03

#### 6.4.2.3. Risikobewertung

Für die Risikobewertung wurden die Energieeffizienzmaßnahmen zunächst nach Kategorien geclustert. Ergebnisse der fragebogenbasierten Risiko- und Aufwandsbewertung sind im Anhang ersichtlich. Es werden Prozess-, Durchführungs- und Planungsrisiken betrachtet. Zunächst wurden die Risiken der Maßnahmenkategorien von drei Experten bewertet. Diese Einzelbewertungen wurden mithilfe des arithmetischen Mittels aggregiert und auf ein Intervall zwischen 0 und 1 transformiert. Die so gewonnenen Ergebnisse sind in Tabelle 39 ersichtlich.

Tabelle 39: Einzelrisikobewertung Fallbeispiel 2

Maßnahmenkategorie	Prozessrisiken	Durchführungsrisiken	Planungsrisiken
Beleuchtung	0	0	0,083
Bedarfsmanagement	0,417	0,25	0,25
Lüftungsanlagen	0,333	0,333	0,333
Prozessoptimierung	0,667	0,5	0,417
Wärmeversorgung	0,417	0,417	0,417
Motoren und Antriebe	0,25	0,167	0,083
Pumpensysteme	0,25	0,167	0,083
Kühlsysteme	0,333	0,25	0,25



Gebäudehülle	0	0,25	0,333
Sonstige	0,083	0,25	0

Als Nächstes erfolgt die Anwendung von linguistischen Variablen, um das Gesamtrisiko der Maßnahmenkategorien zu bestimmen. Die hierfür verwendeten linguistischen Regeln wurden gemeinsam mit dem Unternehmen festgelegt und sind ebenfalls im Anhang ersichtlich. Durch Defuzzifizierung werden die Risikowerte der betrachteten Maßnahmenkategorien gewonnen, die in Tabelle 40 ersichtlich sind.

Tabelle 40: Gesamtrisikobewertung Fallbeispiel 2

Maßnahmenkategorie	Risikowert
Beleuchtung	0.168
Bedarfsmanagement	0.3798
Lüftungsanlagen	0.3474
Prozessoptimierung	0.6514
Wärmeversorgung	0.3872
Elektromotoren	0.3351
Pumpensysteme	0.3351
Kühlsysteme	0.3476
Gebäudehülle	0.3476
Sonstige	0.3476

Für die Bewertung des Umsetzungsaufwands wurde eine qualitative Bewertung der Maßnahmen auf Kategorienebene durchgeführt, welche im Anhang ersichtlich ist.

#### 6.4.2.4. Entscheidungsfindung

Für die Entscheidungsfindung wird ein Diskontierungszins von 4 % verwendet. Laut Umweltbundesamt wird für den Energieträger Strom eine Preisentwicklung auf etwa 4 % pro Jahr bezogen auf das Ausgangsjahr 2015 bis zum Jahr 2050 erwartet (Nicolosi et al. 2021, S. 131). Um im Rahmen der Simulation auch extreme Entwicklungen zu berücksichtigen, wird von jährlichen Preissteigerungen von maximal 6 % und minimal 0 % ausgegangen. Grundlage für die Festlegung der Preissteigerungen des Energieträgers

Gas ist eine Studie im Auftrag der EU-Kommission. In verschiedenen Szenarien wird ein jährlicher Anstieg des Gaspreises von etwas mehr als 2 % pro Jahr zwischen den Betrachtungsjahren 2015 und 2050 erwartet (Duić et al. 2015). Um hier ebenfalls Extremwertszenarien abzubilden, wird die betrachtete maximale jährliche Preissteigerung auf 3 % festgelegt, der minimale Wert auf 0 %.

In Abbildung 62 wird die maximale Investitionshöhe als Nebenbedingung des Entscheidungsmodells in Schritten von 50.000 Euro bis zu einer Höhe von 5 Millionen Euro erhöht, wobei bei dieser Höhe die Summe der individuellen Investitionshöhen der Einzelmaßnahmen erreicht wird. Auf der Ordinate ist etwa die durch den Optimierungsalgorithmus ermittelte erzielbare Energieeinsparung in kWh pro Jahr ersichtlich. Darüber hinaus wurde farblich codiert der erzielbare Kapitalwert des optimalen Investitionsprogramms für jeden Datenpunkt aufgetragen.

Abbildung 62 weist im Vergleich zum vorherigen Fallbeispiel eine andere Charakteristik auf, die durch einen Sprung der erzielbaren Energieeinsparung bei 3,3 Millionen Euro Investitionshöhe bestimmt ist. Grund hierfür ist ein sehr großes Energieeffizienzprojekt, welches sich auf die Erneuerung der Lüftungsanlagen von mehreren Gebäuden bezieht. Mit 2,9 Millionen Euro werden für dieses Projekt höhere Investitionen als für die restlichen Energieeffizienzmaßnahmen (1,9 Millionen Euro) im Datensatz veranschlagt. Ab einer maximalen Investitionshöhe von 3,3 Millionen Euro wird dieses Großprojekt in das Investitionsprogramm aufgenommen. Zuvor ist dies nicht zielmaximierend, da die Maßnahme einen geringen Kapitalwert aufweist. Entsprechend ist im Diagramm des Kapitalwerts zunächst ein Abfallen zu beobachten, wenn das Großprojekt in das Investitionsprogramm aufgenommen wird.

Bei den Risiken zeigt sich, dass diese in Summe zunächst stark mit Aufnahme des Großprojekts sinken, welches mit einem geringen Risiko bewertet wurde. Mit zunehmender maximaler Investitionshöhe steigt die Summe der Risiken jedoch wieder an.

Bei der Amortisationszeit zeigt sich ebenfalls ein durch das Großprojekt geprägtes Verhalten. Zunächst ist bis 1,6 Millionen Euro eine ansteigende Amortisationszeit beobachtbar. Ab 1,6 Millionen stagniert zunächst die Amortisationszeit, da sich das Investitionsprogramm bis zur Aufnahme des Großprojekts ab 3,2 Millionen Euro

---

Investitionshöhe nicht verändert. Mit Aufnahme des Großprojekts steigt die Amortisationszeit signifikant an. Ab Aufnahme des Großprojekts werden weitere kleinere Projekte hinzugefügt, um das Investitionsbudget auszunutzen.

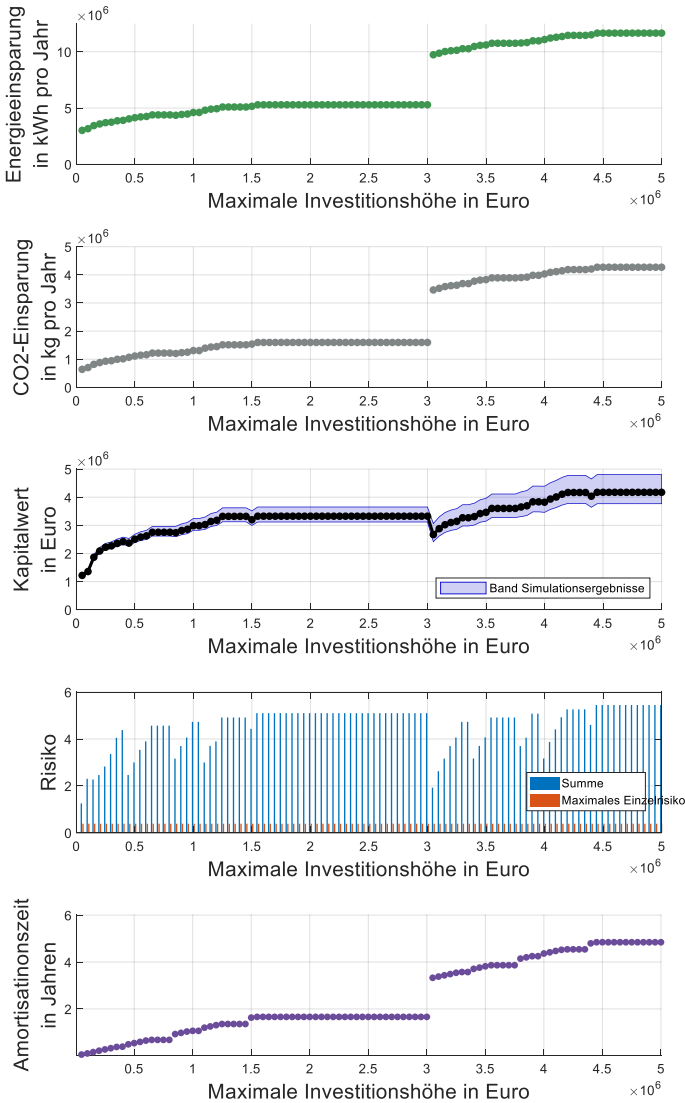


Abbildung 62: Entscheidungsvorlage Fallbeispiel 2

Als Referenzwert für die weitere Betrachtung wird eine Investitionshöhe von maximal 3,5 Millionen Euro festgelegt und eine Abweichung von 20% um diese Höhe betrachtet. Bei den Zielkriterien zeigt sich ebenfalls ein durch das Großprojekt geprägtes Verhalten, welches innerhalb des betrachteten Intervalls in das Investitionsprogramm aufgenommen wird. So ist eine Reduktion der Investitionshöhe um 20 % mit einem Rückgang des Kapitalwerts um lediglich etwa 4 % verbunden, auf der anderen Seite jedoch mit signifikanten Rückgängen bei Energie- und CO<sub>2</sub>-Einsparung. Eine Erhöhung der Investitionshöhe von 20 % ist in Bezug auf den Kapitalwert mit einem annähernd gleichen Anstieg verbunden, bei Energie- und CO<sub>2</sub>-Einsparung mit einem Anstieg von etwa 10 % (vgl. Abbildung 63).

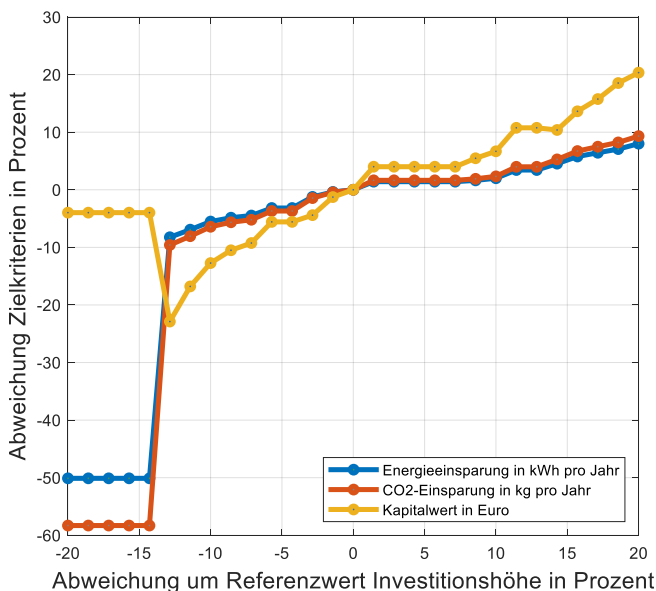


Abbildung 63: Abweichung um Referenzwert 3,5 Millionen Euro (ohne Nebenbedingung)

Aus Sicht des Entscheiders zeigt sich, dass vor allem eine Entscheidung bezüglich der Aufnahme des Großprojektes ausschlaggebend für das Verhalten ist. Eine leichte Steigerung der Investitionshöhe von 10 % ist dabei mit einer verhältnismäßig geringen

Erhöhung der Zielkriterien verbunden. Tabelle 41 fasst die zuvor visuell dargestellte Analyse zusammen.

Tabelle 41: Differenz zwischen Analyse mit und ohne Nebenbedingung um Referenzwert 3,5 Millionen Euro

Abweichung Investitionshöhe	Abweichung Energieeinsparung	Abweichung CO2-Einsparung	Abweichung Kapitalwert
-20 %	-49,09 %	-57,04 %	-4,71 %
-10 %	-6,15 %	-6,86 %	-14,21 %
0 %	0 %	0 %	0 %
10 %	1,89 %	2,2 %	6,32 %
20 %	7,09 %	8,24 %	18,87 %

Besonderes Augenmerk soll auf Energieeffizienzmaßnahmen aus dem Wärmebereich gelegt werden. Hierfür wird eine Nebenbedingung integriert, durch die mindestens 80 % der Energieeffizienzmaßnahmen aus dem Bereich in das Investitionsprogramm aufgenommen werden müssen. Um die so integrierte Nebenbedingung zu erfüllen, müssen von den vorhandenen sieben Maßnahmen aus der Kategorie mindestens sechs in ein Investitionsprogramm aufgenommen werden.

Abbildung 64 stellt die Entscheidungsvorlage bei Einbeziehung der Nebenbedingung dar. Hervorzuheben ist die geringe Investitionshöhe der Maßnahmen aus dem Wärmebereich, wodurch die Nebenbedingung schon bei der geringsten betrachteten Investitionshöhe von 50.000 Euro erfüllt werden kann. Entsprechend sind die Abweichungen zu dem Verhalten ohne besondere Einbeziehung des Wärmebereichs sehr gering.

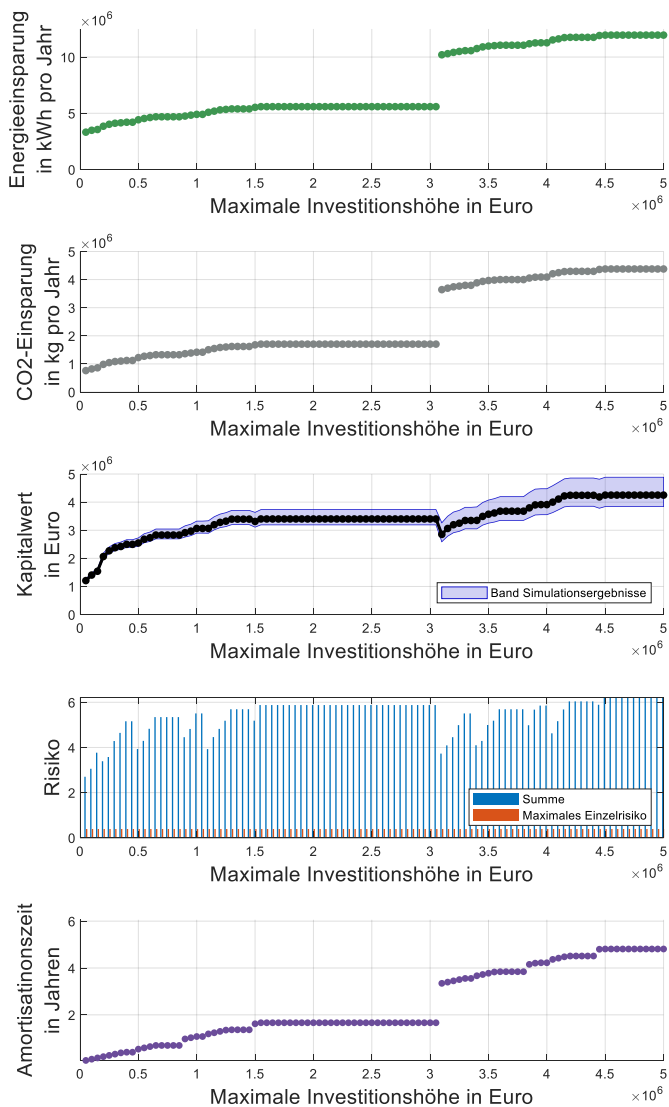


Abbildung 64: Entscheidungsvorlage mit Nebenbedingung „Wärme“ Fallbeispiel 2

Als Referenzwert für die weitere Analyse wird wie zuvor eine Investitionshöhe von maximal 3,5 Millionen Euro festgelegt und eine Abweichung von 20% um diese Höhe betrachtet. Grundsätzlich zeigt sich in Abbildung 65 ein ähnliches Verhalten wie in der Analyse ohne Nebenbedingung, weshalb im nachfolgenden die Differenzen quantitativ betrachtet werden.

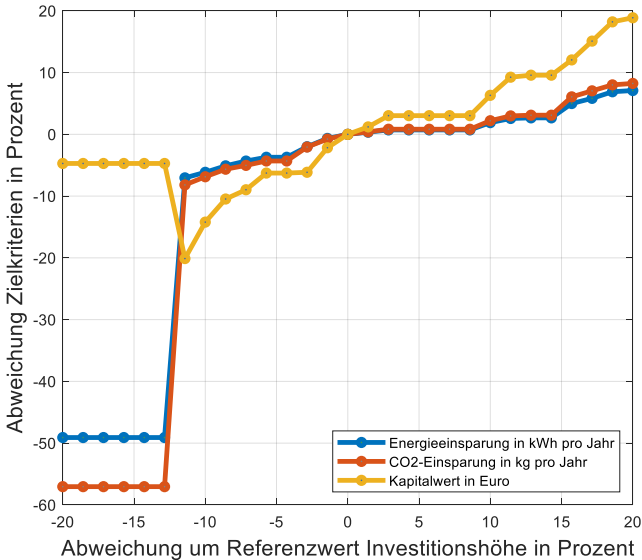


Abbildung 65: Abweichung um Referenzwert 3,5°Millionen Euro mit Nebenbedingung

Tabelle 42 stellt die Differenz der Abweichungen zwischen der Analyse mit Nebenbedingung und der zuvor durchgeführten ohne dar. Wichtige Hauptaussage ist, dass die Differenzen jeweils bei unter 2 % liegen und demnach sehr gering ausfallen. Tendenziell sind die Zielkriterien erwartungsgemäß leicht geringer als bei einer Entscheidungsfindung ohne Nebenbedingung.



Tabelle 42: Abweichung um Referenzwert 3,5 Millionen Euro mit Nebenbedingung

Abweichung Investitionshöhe	Abweichung Energieeinsparung	Abweichung CO2- Einsparung	Abweichung Kapitalwert
-20 %	1,01 %	1,27 %	-0,74 %
-10 %	-0,63 %	-0,44 %	-1,48 %
0 %	0,00 %	0,00%	0,00 %
10 %	-0,11 %	-0,13 %	-0,36 %
20 %	-0,92 %	-1,08 %	-1,47 %

Abbildung 66 stellt die Amortisationszeiten für beide Fälle gegenüber. In Blau dargestellt ist das Verhalten ohne Nebenbedingung, in Rot bei einbezogener Nebenbedingung. Abweichungen sind dabei nur bei einzelnen Datenpunkten zu verzeichnen.

Für das Unternehmen kann gefolgert werden, dass der Fokus auf Maßnahmen aus dem Wärmebereich die jährliche Energieeinsparung der Investitionsprogramme nicht signifikant verschlechtert.

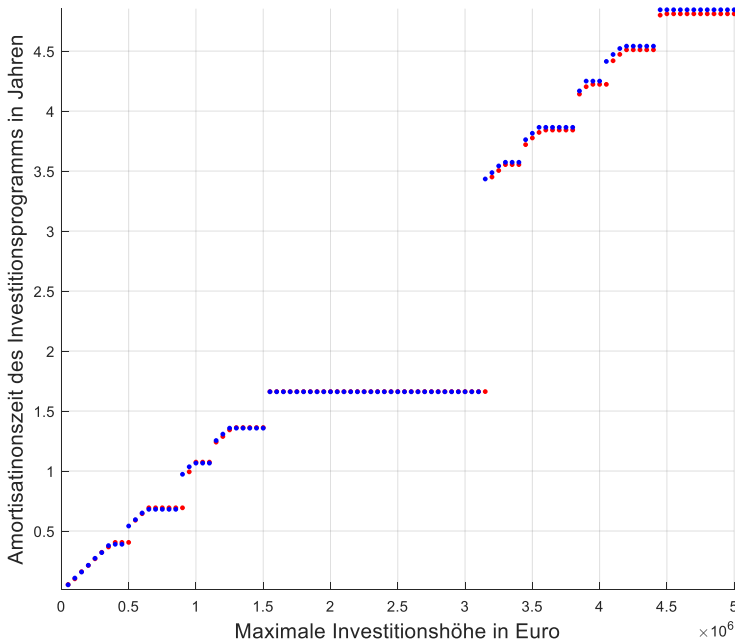


Abbildung 66: Amortisationszeit >80 % der Maßnahmen aus Wärmebereich umgesetzt (Nebenbedingung rot, keine Nebenbedingung blau)

Um den Einfluss des Diskontierungsfaktors zu ermitteln, wurde dieser im Rahmen der in Abbildung 67 dargestellten Analyse von 0 bis 6 % variiert. Darüber hinaus wurden drei unterschiedliche Investitionshöhen betrachtet, welche farblich codiert dargestellt sind.

Der zunehmende Diskontierungszins wirkt sich vor allem negativ auf Energieeffizienzmaßnahmen mit einer langen Nutzungsdauer aus. Entsprechend können Veränderungen des Diskontierungszinses dazu führen, dass andere Energieeffizienzmaßnahmen in das optimale Investitionsprogramm aufgenommen werden. Hierdurch ergeben sich die teilweise leichten Sprünge beim Abfall des Kapitalwerts etwa bei der maximalen Investitionshöhe von einer Million Euro und einer Veränderung des Diskontierungszinses von 5 auf 5,2 %.

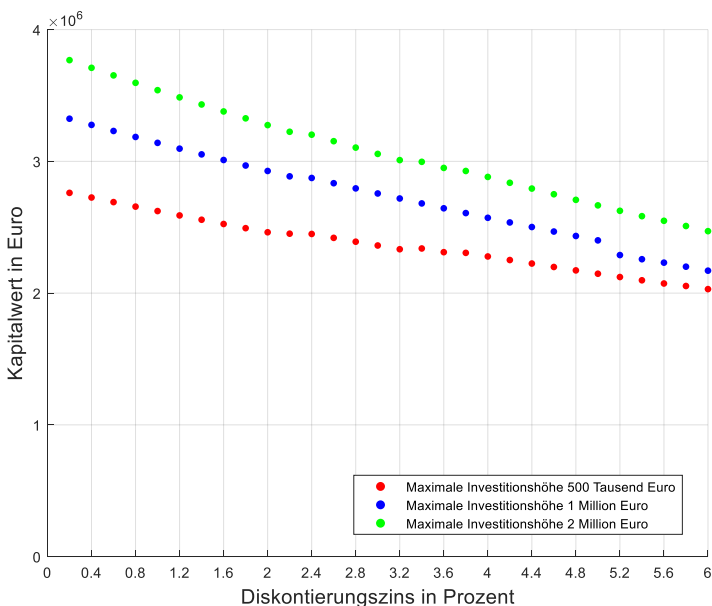


Abbildung 67: Variation Diskontierungszins bei verschiedenen Investitionshöhen  
Fallbeispiel 2

#### 6.4.2.5. Entscheidungsanalyse

Mithilfe der Monte-Carlo-Simulation werden über die individuelle Nutzungsdauer der bestimmten Investitionsprogramme mögliche Energiepreisentwicklungen sowie Abweichungen von der Investitionshöhe und der jährlichen Energieeinsparung betrachtet.

#### Simulationsgrößen

Für den Energieträger Strom wird als Grundlage eine Studie des Umweltbundesamts betrachtet (Nicolosi et al. 2021, S. 131). Im Szenario der höchsten Preisentwicklung beläuft sich die Preisentwicklung auf etwa 4 % pro Jahr bezogen auf das Ausgangsjahr 2015 bis zum Jahr 2050. Um im Rahmen der Simulation auch extreme Entwicklungen zu berücksichtigen, wird von jährlichen Preissteigerungen von maximal 6 % und minimal

0 % ausgegangen. Grundlage für die Festlegung der Preissteigerungen des Energieträgers Gas ist eine Studie im Auftrag der EU-Kommission. In verschiedenen Szenarien wird ein jährlicher Anstieg des Gaspreises von etwas mehr als 2 % pro Jahr zwischen den Betrachtungsjahren 2015 und 2050 erwartet (Duić et al. 2015). Um hier ebenfalls Extremwertszenarien abzubilden, wird die betrachtete maximale jährliche Preissteigerung auf 3 % festgelegt, der minimale Wert auf 0 %.

Weiter einbezogen werden Abweichungen bei der Investitionshöhe. Es wurde eine minimale Abweichung bei der Investitionshöhe von 0 % und eine maximale Abweichung von 8 % festgelegt. Bei den Abweichungen der geplanten jährlichen Energieeinsparung werden Abweichungen zwischen -5 % und 2,5 % der geplanten jährlichen Energieeinsparung betrachtet.

Bei allen Simulationsgrößen wird von einer Gleichverteilung ausgegangen, die durch Minimal- und Maximalwerte festgelegt wird. Tabelle 43 fasst die Eingangswerte der Monte-Carlo-Simulation zusammen.

Tabelle 43: Verwendete Eingangswerte für Monte-Carlo-Simulation

Energieträger	Minimale Preissteigerung pro Jahr	Maximale Preissteigerung pro Jahr
Strom	0 %	6 %
Gas	0 %	3 %

	Minimale prozentuale Abweichung	Maximale prozentuale Abweichung
Investitionshöhe	0 %	8 %
Energieeinsparung	-5 %	2,5 %

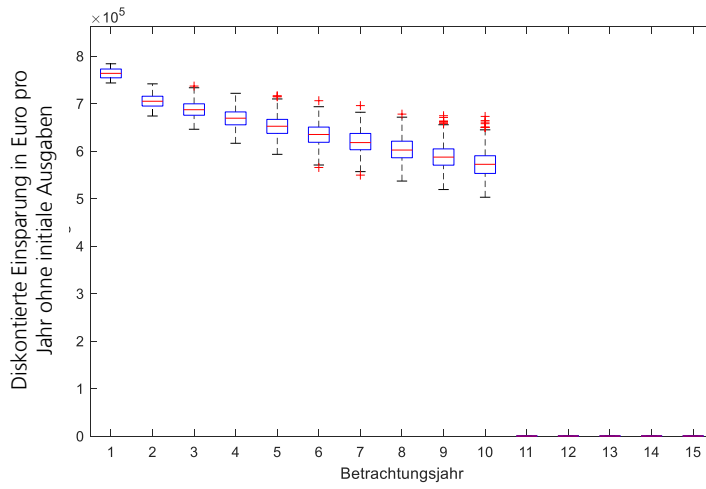
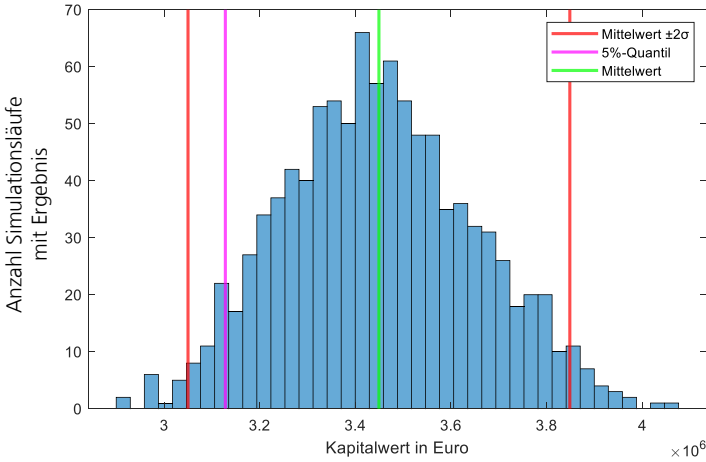
Basierend auf den zuvor allgemeinen Betrachtungen unterschiedlicher Investitionspläne erfolgt nachfolgend eine exemplarische Analyse eines optimalen Investitionsplans. Dieser beinhaltet die zuvor einbezogene Nebenbedingung einer Umsetzung von 80 % aller vorhandenen Energieeffizienzmaßnahmen im Wärmebereich.

Als Bewertungskriterium wird neben dem Mittelwert das Intervall der Abweichung  $\pm 2\sigma$  vom Erwartungswert betrachtet, in dem 95,45 % aller ermittelten Simulationsergebnisse zu finden sind. Da der Mittelwert sehr nah am Median der Ergebnisse liegt, wird dieser nicht explizit in der Darstellung einbezogen.

Weiteres Bewertungskriterium des Investitionsplans ist das 5 %-Quantil. In diesem liegen die 5 % der Simulationsergebnisse mit dem geringsten erzielten Kapitalwert. Dies kann als Kriterium für das Risiko des Investitionsplans gewertet werden.

Die zuvor aggregiert in Form eines Boxplots dargestellten Simulationsergebnisse sind in Abbildung 68 für den betrachteten Investitionsplan in Form eines Histogramms dargestellt. Es zeigt sich insbesondere der Abfall der jahresspezifischen Kapitalwerte nach zehn Jahren, da dies der Nutzungsdauer der Energieeffizienzmaßnahmen innerhalb des betrachteten Investitionsprogramms entspricht.

Kennwerte Investitionsprogramm	Tatsächliche Investitionshöhe in Millionen Euro:	3,49
	Mittelwert Kapitalwert in Millionen Euro:	3,44
	<b>Mittelwert <math>\pm 2\sigma</math> in Millionen Euro:</b>	[3,05; 3,84]
	<b>5%-Quantil in Millionen Euro:</b>	3.12



## Abbildung 68: Entscheidungsanalyse Fallbeispiel 2

Aufgrund der hohen Bedeutung des Großprojekts auf die Performance des Investitionsprogramms soll dessen Einfluss stärker analysiert werden. Hierfür wird eine differenzierte Betrachtung der Maßnahmenkategorien durchgeführt. Je nach Maßnahmenkategorie werden Abweichungen bei der Investitionshöhe und der Energieeinsparung unterschiedlich hoch variiert. So werden etwa bei Energieeffizienzmaßnahmen aus dem Bereich der Beleuchtung geringere Abweichungen erwartet als bei Maßnahmen aus dem Bereich der Wärmeversorgung.

Das Großprojekt wird zudem gesondert betrachtet und in Szenario 2 und 3 mit höheren Unsicherheiten in die Simulation einbezogen. Grund hierfür ist die Annahme, dass aufgrund der Größe und der Umsetzung bei verschiedenen Gebäuden eine grundsätzlich höhere Abweichung zu erwarten ist.

Die unterschiedlichen Szenarien sind so gewählt, dass eine möglichst hohe Bandbreite an unterschiedlichen Entwicklungen simulativ betrachtet wird. Tabelle 44 stellt die verwendeten Eingangsgrößen für die Abweichungen der Investitionshöhe dar.

Tabelle 44: Eingangsgrößen für Simulation (Investitionshöhe)

Maßnahmenkategorie	Abweichung von Investitionshöhe		
	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Beleuchtung	0 % bis 3%	0 % bis 3 %	0 % bis 5 %
Bedarfsmanagement	0 % bis 3%	0 % bis 3 %	0 % bis 5 %
Lüftungsanlagen	0 % bis 5%	0 % bis 8 %	0 % bis 10 %
Prozessoptimierung	0 % bis 5%	0 % bis 8 %	0 % bis 10 %
Wärmeversorgung	0 % bis 5%	0 % bis 8 %	0 % bis 10 %
Elektromotoren	0 % bis 3%	0 % bis 3 %	0 % bis 5 %
Pumpensysteme	0 % bis 3 %	0 % bis 3 %	0 % bis 5 %
Kühlsysteme	0 % bis 5 %	0 % bis 8 %	0 % bis 10 %
Gebäudehülle	0 % bis 5 %	0 % bis 8 %	0 % bis 10 %
Sonstige	0 % bis 5 %	0 % bis 8 %	0 % bis 10 %

---

Großprojekt	0 % bis 5 %	0 % bis 10 %	0 % bis 20 %
-------------	-------------	--------------	--------------

---

Tabelle 45 stellt zudem die verwendeten Eingangsgrößen der Szenarien für die jährlichen Energieeinsparungen dar. In dieser wurden ebenfalls drei unterschiedliche Szenarien definiert, für die jeweils eine eigene Monte-Carlo-Simulation durchgeführt wurde.

Tabelle 45: Eingangsgrößen für Simulation (Energieeinsparung)

Maßnahmenkategorie	Abweichung von der jährlichen Energieeinsparung		
	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Beleuchtung	-3 % bis 3 %	-3 % bis 1,5 %	-3 % bis 0 %
Bedarfsmanagement	-5 % bis 5 %	-5 % bis 2,5 %	-5 % bis 0 %
Lüftungsanlagen	-5 % bis 5 %	-5 % bis 2,5 %	-5 % bis 0 %
Prozessoptimierung	-5 % bis 5 %	-5 % bis 2,5 %	-5 % bis 0 %
Wärmeversorgung	-5 % bis 5 %	-5 % bis 2,5 %	-5 % bis 0 %
Elektromotoren	-3 % bis 3 %	-3 % bis 1,5 %	-3 % bis 0 %
Pumpensysteme	-3 % bis 3 %	-3 % bis 1,5 %	-3 % bis 0 %
Kühlsysteme	-5 % bis 5 %	-5 % bis 2,5 %	-5 % bis 0 %
Gebäudehülle	-5 % bis 5 %	-5 % bis 2,5 %	-5 % bis 0 %
Sonstige	-5 % bis 5 %	-5 % bis 2,5 %	-5 % bis 0 %
Großprojekt	-3 % bis 3 %	-3 % bis 3 %	-3 % bis 0 %

---

Die erzielten Ergebnisse der so durchgeführten Simulation in Form von Boxplots sind in Abbildung 69 ersichtlich. Es zeigt sich eine sehr hohe Überschneidung zwischen Szenario 1 und 2, zwischen denen nur sehr geringe Abweichungen beobachtet werden. Szenario 3 weist im Mittel einen geringeren Kapitalwert als die ersten beiden Szenarien auf.



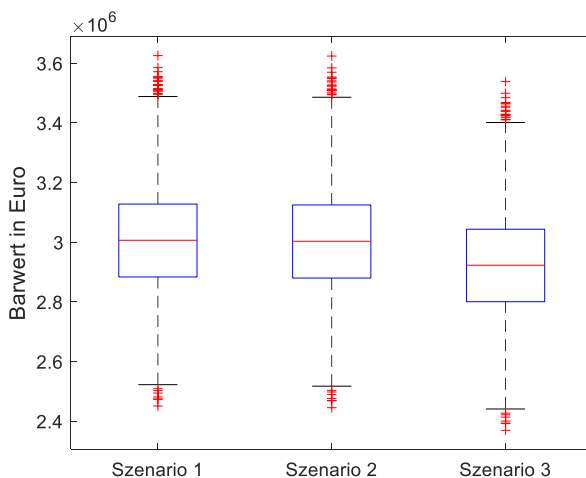


Abbildung 69: Boxplots Monte-Carlo-Simulationen Szenarien 1 – 4 (n=1000)

#### 6.4.2.6. Zwischenfazit

Im Rahmen der Entscheidungsermittlung wurden für die betrachteten Energieeffizienzmaßnahmen und die gewählte Gewichtung der Zieldimensionen optimale Investitionspläne in Abhängigkeit der verfügbaren Investitionshöhe ermittelt. Besonderer Fokus wurde auf die Einbeziehung von Maßnahmen aus dem Wärmebereich gelegt, wobei dies aufgrund der geringen Investitionshöhe bei allen betrachteten Investitionsprogrammen möglich ist. In der Entscheidungsanalyse wurde zudem der Einfluss eines großen Energieeffizienzprojekts innerhalb der verfügbaren Maßnahmen analysiert. Wie sich zeigt, steigt durch dessen Aufnahme in die Investitionspläne die Varianz des Kapitalwerts signifikant an. Aus Unternehmenssicht muss demnach die höhere Unsicherheit durch Aufnahme des Großprojektes berücksichtigt werden.

In Summe ergibt sich durch Entscheidungsfindung und -analyse eine umfassende Entscheidungsunterstützung für die Auswahl von Energieeffizienzmaßnahmen unter Einbeziehung der gewählten Nebenbedingungen. Das betrachtete Unternehmen kann

mithilfe der präsentierten Ergebnisse Investitionsprogramme auswählen und deren Verhalten in verschiedenen Szenarien in die Entscheidungsfindung einbeziehen.

## 6.5. Bewertung der Erfüllung der Anforderungen

Durch Anwendung des Entscheidungsmodells für die Bestimmung optimaler Investitionsprogramme von Energieeffizienzmaßnahmen in der Fabrik erfolgte der erste Validierungsansatz, indem das Artefakt gegen einen Ausschnitt der Realwelt validiert wurde, um dessen Nutzen zu bewerten. Nachfolgend erfolgt der zweite Validierungsansatz, in dem die Erfüllung der Anforderungen des konstruierten Artefakts bewertet wird.

### 6.5.1. Anforderungen an das Entscheidungsmodell

Die zuvor abgeleiteten Anforderungen an das Artefakt in Form eines Entscheidungsmodells für die Bestimmung optimaler Investitionsprogramme von Energieeffizienzmaßnahmen in der Fabrik werden nun im Einzelnen auf ihre Erfüllung geprüft.

*Multikriterielle Zielfunktion:* Nach Sichtung des Stands der Technik und der Wissenschaft wurde die Einteilung der strategischen Zieldimensionen der Energieeffizienz nach Cooremans (2012) aufgegriffen und adaptiert. Im Rahmen des Entscheidungsmodells wurden die drei Dimensionen ökonomisch, ökologisch sowie umsetzungsbezogen mit weiteren untergeordneten Zielkriterien betrachtet. Hierdurch konnte die Anforderung an eine multikriterielle Zielfunktion erfüllt werden.

*Variable Gewichtung von Entscheiderpräferenzen:* Aufgrund der Kritik an einer durch den Anwender frei festgelegten Zielgewichtung wird für die Gewichtung der Zieldimensionen ein Teil des analytischen Hierarchieprozesses nach Saaty durchgeführt, bei dem die Gewichtungen implizit über die Durchführung von paarweisen Vergleichen ermittelt werden. Hierdurch wurde die Anforderung voll erfüllt.

*Eignung für unterschiedliche Systemebenen:* Durch eine hierarchieebenenunabhängige Modellierung und Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen ist das

Entscheidungsmodell für alle Ebenen der Fabrik geeignet. Im Rahmen des ersten Fallbeispiels konnte das Entscheidungsmodell insbesondere auf der höchsten Stufe der Fabrik, auf Ebene von Produktionsnetzwerken, eingesetzt und validiert werden. Die Anforderung gilt demnach als erfüllt.

*Berücksichtigung von unternehmerischen Nebenbedingungen:* Die Entscheidung über die Auswahl und Priorisierung von Energieeffizienzmaßnahmen erfolgt nicht isoliert, sondern unter Einbeziehung von Nebenbedingungen, die als Randbedingungen in die Auswahl mit einfließen. In Kapitel 5.5 wurden relevante Nebenbedingungen des Entscheidungsmodells identifiziert und bei der Validierung gegen den Auszug der Realwelt in Form der beiden Fallbeispiele einbezogen. Die Anforderung ist deshalb voll erfüllt.

### 6.5.2. Anforderungen an die Maßnahmenbewertung

*Berücksichtigung von Risiken:* Die Analyse des Stands der Technik und der Wissenschaft zeigte einen grundlegenden Mangel an Methoden für die Risikobewertung von Energieeffizienzmaßnahmen. Vor dem Hintergrund wurde eine auf der Fuzzy-Logik basierende Risikobewertungsmethode für Energieeffizienzmaßnahmen entwickelt sowie im Verlauf in die Entscheidungsfindung eine simulative Untersuchung der wirtschaftlichen Risiken einbezogen und die gestellte Anforderung hierdurch erfüllt.

*Einbeziehung von Wechselwirkungen:* Energieeffizienzmaßnahmen können sich in ihren Wirkeffekten gegenseitig beeinflussen. Bei der optimierten Auswahl von Maßnahmenbündeln muss dies berücksichtigt werden. Für die Bewertung von Wechselwirkungen zwischen Energieeffizienzmaßnahmen wurde auf Vorarbeiten zurückgegriffen, die von Dehning (2017) in dessen Dissertation gelegt wurden. Im Rahmen der beiden Fallbeispiele konnten keine Wechselwirkungen zwischen Energieeffizienzmaßnahmen verzeichnet werden. Eine Validierung der Methode wurde jedoch bereits von Dehning durchgeführt. Die Anforderung gilt deshalb als erfüllt, Schwächen sind jedoch in Bezug auf eine quantitative Bewertung von Wechselwirkungen vorhanden. Für deren Einbeziehung müsste eine individuelle Wirkungsanalyse der Wechselwirkungen der Energieeffizienzmaßnahmen durchgeführt werden, worauf durch

die dafür notwendige individuelle Betrachtung im Zuge einer möglichst generischen Einbeziehung der Energieeffizienzmaßnahmen verzichtet wurde.

*Generische Modellierung von Energieeffizienzmaßnahmen:* Energieeffizienzmaßnahmen sind durch ein hohes Spektrum an unterschiedlichen, teilweise branchenspezifischen Maßnahmen charakterisiert. Das Entscheidungsmodell muss diese Komplexität berücksichtigen und eine generische Modellierung für Energieeffizienzmaßnahmen ermöglichen. Das entwickelte Bewertungsmodell für Energieeffizienzmaßnahmen ist in seinen Bewertungskriterien unabhängig von der Art und Kategorie von Maßnahmen, kann also für alle Energieeffizienzmaßnahmen im Gegenstandsbereich verwendet werden. Hierdurch wurde die Anforderung voll erfüllt.

In Bezug auf die Maßnahmenbewertung zeigt sich zudem, dass die grundlegenden Anforderungen an eine Maßnahmenbewertung von Energieeffizienzmaßnahmen nach Fleiter et al. (2012a) erfüllt werden:

- Relevanz: Alle Kriterien für die Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen besitzen aufgrund der in Kapitel 5.4 dargelegten Begründungen eine Relevanz für die Entscheidungsfindung.
- Anwendbar: Die Kriterien sind allgemein genug, um für alle im Gegenstandsbereich des Entscheidungsmodells liegenden Energieeffizienzmaßnahmen geeignet zu sein.
- Spezifisch: Die Kriterien sind jeweils so spezifisch, dass sie konkret und objektiv ausgewertet werden können.
- Unabhängig: Die Kriterien sind unabhängig von spezifischen Unternehmen und weiteren kontextuellen Faktoren, wodurch die Vergleichbarkeit zwischen verschiedenen Energieeffizienzmaßnahmen gewährleistet ist.
- Unterscheidbar: Die Kriterien überschneiden sich nicht und sind voneinander unterscheidbar.

### 6.5.3. Anforderung an die Risikobewertung von Energieeffizienzmaßnahmen

Neben der grundlegenden Erfüllung der Einbeziehung von Risiken bei der Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen wurden weitere Teilanforderungen an diese gestellt. Für die Bestimmung des Gesamtrisikos müssen die *Wechselwirkungen der Risiken* zueinander bewertbar sein, da Risiken sich gegenseitig beeinflussen können. Innerhalb der Methode werden Wechselwirkungen zwischen den Einzelrisiken durch eine linguistische Logik einbezogen, die von Experten mithilfe von Fragebögen generiert wird. Hierdurch können Wechselwirkungen zwischen Einzelrisiken einbezogen werden und die Anforderung ist somit erfüllt. Aufgrund der individuellen Charakterisierung von Energieeffizienzmaßnahmen und der potenziell hohen Menge an zur Verfügung stehenden Maßnahmen sollen diese sowohl *quantitativ als auch qualitativ* ohne explizite Kenntnis von Schadensausmaß und Eintrittswahrscheinlichkeit bewertbar sein. Der auf der Fuzzy-Logik basierte Ansatz ermöglicht sowohl eine quantitative Bewertung der Risiken als auch eine auf Expertenwissen basierte Bewertung, bei der die Ausprägung der Risiken analog einer Risikomatrix bewertet wird. Hierdurch konnte die Anforderung an die Risikobewertung erfüllt werden.

### 6.5.4. Zwischenfazit

In Summe zeigt sich eine umfangliche Erfüllung der Anforderungen an das Artefakt. Die individuellen Anforderungen an das Entscheidungsmodell sowie die Risikobewertung konnten alle vollumfänglich erfüllt werden. Bei der Bewertung der Erfüllung der Anforderungen an die Maßnahmenbewertung zeigt sich einschränkend eine Limitation bei der Erfüllung der Einbeziehung von Wechselwirkungen. Im Rahmen der Validierung durch zwei Fallbeispiele waren jeweils keine Wechselwirkungen vorhanden. Aus diesem Grund wurden die Wechselwirkungsbewertung gesondert anhand von zwei Energieeffizienzmaßnahmen durchgeführt. Eine Validierung der qualitativen Bewertung erfolgte bereits in der Vorarbeit von Dehning (2017). In Summe wird deshalb auch von einer vollumfänglichen Erfüllung der Anforderung ausgegangen.

Weitere leichte Schwächen ergeben sich durch den Umfang der Validierung, bei der die Skalierung des entwickelten Entscheidungsmodells auf eine sehr hohe Anzahl von Energieeffizienzmaßnahmen nicht überprüft werden konnte, da innerhalb der Fallbeispiele jeweils weit weniger als 100 Maßnahmen betrachtet wurden. Im Rahmen der Fallbeispiele zeigt sich jedoch grundsätzlich eine hohe Performance des Optimierungsalgorithmus, die auch bei Aggregation beider Maßnahmenmengen erhalten bleibt. Zudem ist aufgrund der grundsätzlichen Eignung der gemischtganzzahligen Optimierung für große Datensätze von einer guten Performance bei praxisnahen Maßnahmenmengen auszugehen. Abbildung 70 fasst die Erfüllung der Anforderungen mit den gefundenen Limitationen zusammen.

	Anforderung	Bewertung	Limitation
Entscheidungsmodell	Multikriterielle Zielfunktion	●	-
	Variable Gewichtung von Entscheiderpräferenzen	●	-
	Eignung für unterschiedliche Systemebenen	●	-
	Berücksichtigung von unternehmerischen Nebenbedingungen	●	-
Maßnahmenbewertung	Berücksichtigung von Risiken	●	-
	Einbeziehung von Wechselwirkungen	●	Keine Wechselwirkungen in Fallbeispielen verfügbar
	Generische Modellierung von Energieeffizienzmaßnahmen	●	-
Risiko-bewertung	Qualitative und quantitative Risikobewertung möglich	●	-
	Wechselwirkungen der Risiken bewertbar	●	-

Abbildung 70: Erfüllung der Anforderungen an das Artefakt

## 6.6. Zusammenfassung

Im zurückliegenden Kapitel wurde das entwickelte Artefakt in Form eines Entscheidungsmodells für die Bestimmung optimaler Investitionsprogramme von Energieeffizienzmaßnahmen in der Fabrik im Rahmen der Forschungsmethode durch zwei Ansätze validiert.

Das Artefakt wurde anhand von zwei Fallbeispielen gegen einen Ausschnitt aus der Realwelt validiert. Für beide Fallbeispiele konnten optimale Investitionspläne unter Variation der verfügbaren Investitionshöhe bestimmt werden sowie weitere Nebenbedingungen in Form von Limitationen der geografischen Verteilung oder an die Umsetzung bestimmter Maßnahmenkategorien einbezogen werden. Darüber hinaus wurde innerhalb der Entscheidungsanalyse durch eine Monte-Carlo-Simulation das Verhalten bestimmter Investitionsprogramme untersucht.

Durch die Ableitung einer Entscheidungsunterstützung in Form von Entscheidungsdarstellungen konnten transparente und objektive Visualisierungen abgeleitet werden, welche dem Entscheider eine optimale Entscheidungsfindung ermöglichen. Dies stellt in Summe den Nutzen des Entscheidungsmodells dar.

Durch die Prüfung der Erfüllung der Anforderung erfolgte der zweite Validierungsansatz. Die Diskussion der Anforderungserfüllung im Kapitel 6.5 zeigt eine volle Erfüllung der zuvor abgeleiteten Anforderungen an das Entscheidungsmodell. In Summe konnte hierdurch im Kapitel 6 das Gestaltungsziel des Forschungsvorhabens validiert werden.

# 7. Reflexion, Zusammenfassung und Ausblick

Im letzten Kapitel dieser Arbeit wird die Beantwortung der Forschungsfragen reflektiert. Die Beantwortung der Forschungsfragen stellt neben der Entwicklung und Validierung des Artefakts als Gestaltungsziel das zentrale Element des Forschungsvorhabens in Form des Erkenntnisziels dar. Anschließend wird die Arbeit zusammengefasst und ein Ausblick auf folgende Arbeiten vorgenommen.

## 7.1. Beantwortung der Forschungsfragen

Das Erkenntnisziel der vorliegenden Arbeit wird durch die Beantwortung der gestellten Forschungsfrage und deren untergeordnete Teilforschungsfragen erreicht. Die zentrale Forschungsfrage der Arbeit lautet:

### **Wie kann ein Entscheidungsmodell für die optimierte Auswahl von Energieeffizienzmaßnahmen in der Fabrik konzipiert werden?**

Es wurden aufbauend auf der Hauptforschungsfrage folgende Teilforschungsfragen gestellt, die in Summe die übergeordnete Forschungsfrage des Vorhabens beantworten:

1. *Welche Anforderungen werden an ein Entscheidungsmodell für die optimierte Auswahl von Energieeffizienzmaßnahmen in der Fabrik gestellt?* In Kapitel 4.2 wurden Anforderungen an ein Entscheidungsmodell für die Bestimmung von optimalen Investitionsprogrammen von Energieeffizienzmaßnahmen in der Fabrik definiert. Diese Anforderungen gliedern sich in Anforderungen an das Entscheidungsmodell selbst, an die Maßnahmenbewertung sowie an die Risikobewertung von Energieeffizienzmaßnahmen.
2. *Wie kann ein relevantes Zielsystem für die Auswahl von Energieeffizienzmaßnahmen in der Fabrik gestaltet werden?* In Kapitel 5.3 wurde ein Zielsystem für die optimale Auswahl von Energieeffizienzmaßnahmen entwickelt. In



Summe ergibt sich ein Zielsystem aus ökonomischen, ökologischen sowie umsetzungsbezogenen Dimensionen.

3. *Wie kann ein Bewertungsmodell für Energieeffizienzmaßnahmen gestaltet werden?* In Kapitel 5.4. wurde ein Bewertungsmodell für Energieeffizienzmaßnahmen entwickelt. Dieses greift zunächst die zuvor ermittelten Zieldimensionen auf und ordnet diesen Bewertungskriterien zu. Mithilfe dieser Kriterien können Energieeffizienzmaßnahmen bewertet und aufbauend auf dieser Bewertung mithilfe des Entscheidungsmodells optimale Investitionspläne bestimmt werden.

4. *Wie kann ein Entscheidungsmodell für die Bestimmung optimaler Investitionsprogramme von Energieeffizienzmaßnahmen in der Fabrik konzipiert werden?* Kapitel 5 stellt in Summe die Bestandteile sowie ein Vorgehen für die Konzeption eines Entscheidungsmodells für die optimierte Auswahl von Energieeffizienzmaßnahmen in der Fabrik dar.

In Summe wird durch Beantwortung der Teilforschungsfragen die übergeordnete Forschungsfrage der Arbeit beantwortet und hierdurch das Erkenntnisziel der Arbeit erfüllt.

## 7.2. Zusammenfassung und Ausblick

Die formulierte Zielsetzung des Forschungsvorhabens basiert auf der These, dass Entscheidungsträger in der Praxis durch ein Entscheidungsmodell in ihrer rationalen Entscheidungsfindung unterstützt werden können. Unternehmen stehen zunehmend vor der Herausforderung, Energie- und Klimaziele zu formulieren und mehr noch möglichst zügig umzusetzen. Die anstehenden Entscheidungen sind dabei in ihrer Komplexität in der Regel von den verantwortlichen Entscheidungsträgern nicht mehr überblickbar und aufgrund der eingeschränkten Rationalität von menschlichen Entscheidungen nur in seltenen Fällen im mathematischen Sinne optimal.

Durch die Entwicklung eines Entscheidungsmodells für die Bestimmung von optimalen Investitionsprogrammen von Energieeffizienzmaßnahmen in der Fabrik wird es

Unternehmen ermöglicht, Entscheidungen bei der Auswahl von Energieeffizienzmaßnahmen transparent und optimiert durchzuführen. Aufbauend auf dem Entscheidungsmodell werden Entscheidungsdarstellungen abgeleitet, welche für den Entscheider einen Nutzen bei der Entscheidungsfindung darstellen, da basierend auf der individuellen Situation und Präferenz optimale Entscheidungen getroffen werden können.

Hierdurch werden auf einer höheren Ebene Hemmnisse in der Energieeffizienz abgebaut, die für eine erfolgreiche Energiewende unabdingbar sind. Durch die auf einer optimierten Auswahl der Energieeffizienzmaßnahmen aufbauenden Entscheidungsanalyse können zudem die Auswirkungen des bestimmten Investitionsprogramms in verschiedenen Szenarien betrachtet und analysiert werden. Insbesondere vor der aktuellen Energiepreiskrise wird hierdurch Unternehmen ein Werkzeug bereitgestellt, um fundierte Entscheidungen zu treffen und den Beitrag der Energieeffizienz zu einer Dämpfung von Energiepreissteigerungen zu quantifizieren.

Es ist davon auszugehen, dass die Bedeutung einer Entscheidungsunterstützung bei der Auswahl von Energieeffizienzmaßnahmen weiter zunehmen wird. Neben einem immer stärker werdenden Dekarbonisierungsdruck in der Industrie wird zunehmend an datenbasierten automatisierten Methoden, etwa im Bereich der Anomalieerkennung, geforscht, welche zu einer automatisierten Generierung von Energieeffizienzmaßnahmen führen. Zu einem gegebenen Zeitpunkt wird die Anzahl der verfügbaren Energieeffizienzmaßnahmen demnach immer weiter zunehmen und die zu treffenden Entscheidungen immer komplexer werden.

Auf einer höheren Ebene trifft dies generell für die Entscheidungsfindung zu. Durch den Einsatz von KI-Assistenzsystemen werden in kommenden Jahren viele Aspekte der heute noch menschlichen Entscheidungsfindung (teil-)automatisiert werden. Dies setzt jedoch die Entwicklung von Entscheidungsmodellen voraus, welche als Grundlage für die automatisierte Entscheidungsfindung dienen.

Im Rahmen der Arbeit konnte durch die Entwicklung eines Entscheidungsmodells die Grundlage für eine automatisierte und optimale Entscheidungsfindung in der Energieeffizienz gelegt werden, indem aufbauend auf einer Anforderungsanalyse die

relevanten Bestandteile eines Entscheidungsmodells für die Bestimmung optimaler Investitionsprogramme in der Energieeffizienz formuliert wurden. Hierbei ist insbesondere die gleichzeitige Berücksichtigung von Risiken, Wechselwirkungen, Nebenbedingungen und einer multikriteriellen Entscheidungsfindung zu nennen.

Die in Kapitel 1.4. gewählte Forschungsmethode des Design Science Research Methodology und dessen Bestandteile wurden innerhalb der Arbeit durchlaufen und so der Forschungsprozess abgeschlossen. Im ersten Kapitel wurde die Problemstellung motiviert und deren grundlegende Zielsetzung dargelegt. Im vierten Kapitel wurden Anforderungen an das Entscheidungsmodell definiert und dieses basierend auf diesen in Kapitel 5 entwickelt. Die Demonstration des Artefakts und dessen Validierung wurden mithilfe zweier Fallbeispiele durchgeführt. Die Bewertung der erzielten Ergebnisse erfolgte anschließend durch Überprüfung der Erfüllung der Anforderungen sowie der Beantwortung der Forschungsfragen. Der letzte Schritt der Kommunikation erfolgt durch Veröffentlichung der Forschungsergebnisse im Rahmen dieser Arbeit.

Weiteres Potenzial für anknüpfende Forschungsvorhaben ist in folgenden Bereichen zu sehen: Durch die Einbeziehung von Monte-Carlo-Simulationen können die Auswirkungen der Investitionsprogramme auch unter Berücksichtigung und Variation unterschiedlicher Einflussfaktoren ermittelt werden. Auf einer höheren Ebene ergibt sich hier ein Potenzial für eine umfassende Risikobewertung, welche basierend auf Energieverbräuchen eines Unternehmens neben den monetären Auswirkungen von möglichen Energiepreissteigerungen unterschiedlicher Energieträger zudem mithilfe eines Entscheidungsmodells die Risikoreduktion von Energieeffizienzmaßnahmen einbeziehen und quantifizieren könnte. Hierdurch kann der Vorteil von Energieeffizienzmaßnahmen in Form einer stärkeren Abkopplung von Energiepreissteigerungen transparent quantifiziert werden, wodurch bei Unternehmen tendenziell von höheren Anreizen für die Umsetzung von Energieeffizienzmaßnahmen auszugehen ist.

Für anschließende Arbeiten ist zudem eine Erweiterung des Entscheidungsmodells hin zu einem mehrperiodischen Entscheidungsmodell denkbar, welches neben den beschriebenen Ressourcen auch die Einbeziehung von neuen Energieeffizienzmaßnahmen bei der mehrperiodischen Planung berücksichtigt.

Weitergehendes Potenzial ergibt sich durch die Verallgemeinerung des Entscheidungsmodells auf Dekarbonisierungsmaßnahmen allgemeiner Art, wobei insbesondere auch der Bezug und die Eigenerzeugung von erneuerbaren Energien, aber auch Kompensationsmaßnahmen einbezogen werden sollten. Wissenschaftlich ist hierbei die gegenseitige Beeinflussung der Maßnahmen von Bedeutung, da etwa die CO<sub>2</sub>-Intensität der Energiebeschaffung das Einsparpotenzial an CO<sub>2</sub>-Emissionen durch Energieeffizienzmaßnahmen beeinflusst. Hierdurch kommt es neben der optimierten Auswahl an Dekarbonisierungsmaßnahmen zu einem komplexen wechselseitigen Beeinflussungsmodell.

## 8. Literaturverzeichnis

### **Adam 1993**

Adam, Dietrich, 1993. *Planung und Entscheidung: Modelle – Ziele – Methoden*.  
3., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage.  
Wiesbaden: Gabler Verlag.  
ISBN 9783322893475  
DOI: 10.1007/978-3-322-89347-5

### **Ahlert 2003**

Ahlert, Martin, 2003. *Einsatz des Analytic Hierarchy Process Im Relationship Marketing: Eine Analyse Strategischer Optionen Bei Dienstleistungsunternehmen*.  
Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH.  
ISBN 9783322964809

### **Allcott et al. 2012**

Allcott, Hunt; Greenstone, Michael, 2012. Is There an Energy Efficiency Gap?  
*Journal of Economic Perspectives* **26** (1), S. 3–28  
DOI: 10.1257/jep.26.1.3

### **Amann 2019**

Amann, Erwin, 2019. *Entscheidungstheorie: Individuelle, strategische und kollektive Entscheidungen*.  
Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.  
Studienbücher Wirtschaftsmathematik.  
ISBN 9783658245153  
DOI: 10.1007/978-3-658-24515-3

### **Andaloro et al. 2021**

Andaloro, Annalisa; Salvalai, Graziano; Fregonese, Gabriele; Tso, Linda; Paoletti, Giulia, 2021. Framework for Evaluating Financial Impacts of Technical Risks Related to Energy-Efficient Renovation of Commercial Office Buildings.  
*Environmental Sciences Proceedings* **11** (1), S. 32  
DOI: 10.3390/environsciproc2021011032

- Andrews et al. 2016** Andrews, Richard N.L.; Johnson, Evan, 2016. Energy use, behavioral change, and business organizations: Reviewing recent findings and proposing a future research agenda. *Energy Research & Social Science* **11**, S. 195–208  
DOI: 10.1016/j.erss.2015.09.001
- Aragon et al. 2012** Aragon, T. J.; Dalnoki-Veress, F.; & Shiu, K., 2012. *Deriving Criteria Weights for Health Decision Making: A Brief Tutorial*.  
Verfügbar unter:  
<https://escholarship.org/uc/item/4366g5pv>  
Zugriff am: 29.10.2022
- Ascione et al. 2015** Ascione, Fabrizio; Bianco, Nicola; Stasio, Claudio de; Mauro, Gerardo Maria; Vanoli, Giuseppe Peter, 2015. A new methodology for cost-optimal analysis by means of the multi-objective optimization of building energy performance. *Energy and Buildings* **88**, S. 78–90  
DOI: 10.1016/j.enbuild.2014.11.058
- Backlund et al. 2012** Backlund, Sandra; Thollander, Patrik; Palm, Jenny; Ottosson, Mikael, 2012. Extending the energy efficiency gap. *Energy Policy* **51**, S. 392–396  
DOI: 10.1016/j.enpol.2012.08.042
- Banks et al. 2012** Banks, Nick; Fawcett, Tina; Redgrove, Zoe, 2012. *What are the factors influencing energy behaviours and decision-making in the non-domestic sector? A rapid evidence assessment*, Centre for Sustainable Energy (CSE) and the Environmental Change Institute, University of Oxford (ECI).  
Verfügbar unter: [www.cse.org.uk/downloads/reports-and-publications/behaviour-change/factors\\_influencing\\_energy\\_behaviours\\_in\\_non-dom\\_sector.pdf](http://www.cse.org.uk/downloads/reports-and-publications/behaviour-change/factors_influencing_energy_behaviours_in_non-dom_sector.pdf)  
Zugriff am: 29.10.2022

- Bayata et al. 2017** Bayata, Özgür; Temiz, İzzettin, 2017. Developing a model and software for energy efficiency optimization in the building design process: a case study in Turkey. *TURKISH JOURNAL OF ELECTRICAL ENGINEERING & COMPUTER SCIENCES* **25**, S. 4172–4186  
DOI: 10.3906/elk-1612-13
- Becker et al. 2009** Becker, Jörg; Krcmar, Helmut; Niehaves, Björn, 2009. *Wissenschaftstheorie und gestaltungsorientierte Wirtschaftsinformatik*.  
1. Aufl.  
Heidelberg: Physica-Verlag.  
ISBN 978-3-7908-2335-6  
DOI: 10.1007/978-3-7908-2336-3
- Blesl et al. 2017** Blesl, Markus; Kessler, Alois, 2017. *Energieeffizienz in der Industrie*.  
2. Auflage.  
Berlin: Springer Vieweg.  
ISBN 3662559986
- Bonilla-Campos et al. 2020** Bonilla-Campos, Iñigo; Nieto, Nerea; Del Portillo-Valdes, Luis; Manzanedo, Jaio; Gaztañaga, Haizea, 2020. Energy efficiency optimisation in industrial processes: Integral decision support tool. *Energy* **191**, S. 116480  
DOI: 10.1016/j.energy.2019.116480
- Brauweiler 2019** Brauweiler, Hans-Christian, 2019. *Risikomanagement in Unternehmen: Ein grundlegender Überblick für die Management-Praxis*.  
2., erweiterte und ergänzte Auflage.  
Wiesbaden: Springer Gabler.  
ISBN 9783658234805  
DOI: 10.1007/978-3-658-23480-5
- Bre et al. 2017** Bre, Facundo; Fachinotti, Víctor D., 2017. A computational multi-objective optimization method to improve energy efficiency and thermal comfort in dwellings. *Energy and Buildings* **154**, S. 283–294  
DOI: 10.1016/j.enbuild.2017.08.002

- Brunke et al. 2014** Brunke, Jean-Christian; Johansson, Maria; Thollander, Patrik, 2014. Empirical investigation of barriers and drivers to the adoption of energy conservation measures, energy management practices and energy services in the Swedish iron and steel industry. *Journal of Cleaner Production* **84**, S. 509–525  
DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.04.078
- Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle 2020** Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA), 2020. *Leitfaden zur Erstellung von Energieauditberichten nach den Vorgaben der DIN EN 16247-1*.  
Verfügbar unter:  
[www.bafa.de/SharedDocs/Downloads/DE/Energie/ea\\_leitfaden.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=26](http://www.bafa.de/SharedDocs/Downloads/DE/Energie/ea_leitfaden.pdf?__blob=publicationFile&v=26)  
Zugriff am: 01.05.2022
- Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle 2022** Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA), 2022. *Informationsblatt CO<sub>2</sub>-Faktoren*.  
Verfügbar unter:  
[https://www.bafa.de/SharedDocs/Downloads/DE/Energie/eew\\_infoblatt\\_co2\\_faktoren\\_2021.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=5](https://www.bafa.de/SharedDocs/Downloads/DE/Energie/eew_infoblatt_co2_faktoren_2021.pdf?__blob=publicationFile&v=5)  
Zugriff am: 19.12.2023
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie 2020** Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2020. *Energieeffizienz in Zahlen: Entwicklungen und Trends in Deutschland 2020*.  
Verfügbar unter:  
[www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/energieeffizienz-in-zahlen-2020.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=20](http://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/energieeffizienz-in-zahlen-2020.pdf?__blob=publicationFile&v=20)  
Zugriff am: 20.11.2021
- Bundesministerium für Finanzen 2021** Bundesministerium für Finanzen, 2021. *AfA-Tabellen*.  
Verfügbar unter:  
[www.bundesfinanzministerium.de/Web/DE/Themen/Steuern/Steuerverwaltung-Steuerrecht/Betriebspruefung/AfA\\_Tabellen/afa\\_tabelle\\_n.html](http://www.bundesfinanzministerium.de/Web/DE/Themen/Steuern/Steuerverwaltung-Steuerrecht/Betriebspruefung/AfA_Tabellen/afa_tabelle_n.html)  
Zugriff am: 12.12.2021



- 
- Busse von Colbe et al. 2018** Busse von Colbe, Walther; Witte, Frank, 2018. *Investitionstheorie und Investitionsrechnung*. 5. Aufl. 2018. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. SpringerLink Bücher. ISBN 9783662579077 DOI: 10.1007/978-3-662-57907-7
- Cagno et al. 2014** Cagno, Enrico; Trianni, Andrea, 2014. Evaluating the barriers to specific industrial energy efficiency measures: an exploratory study in small and medium-sized enterprises. *Journal of Cleaner Production* **82**, S. 70–83 DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.06.057
- Cano et al. 2014** Cano, Emilio L; Moguerza, Javier M; Ermolieva, Tatiana; Ermoliev, Yuri, 2014. Energy efficiency and risk management in public buildings: strategic model for robust planning. *Computational Management Science* **11** (1-2), S. 25–44 DOI: 10.1007/s10287-013-0177-3
- Carr et al. 2001** Carr, V; Tah, J.H.M, 2001. A fuzzy approach to construction project risk assessment and analysis: construction project risk management system. *Advances in Engineering Software* **32** (10-11), S. 847–857 DOI: 10.1016/S0965-9978(01)00036-9
- Chakraborty 2022** Chakraborty, Subrata, 2022. TOPSIS and Modified TOPSIS: A comparative analysis. *Decision Analytics Journal* **2**, S. 100021 DOI: 10.1016/j.dajour.2021.100021
- Conrad 2020** Conrad, Jochen. *Modellierung und Bewertung von Maßnahmen zur kosteneffizienten CO<sub>2</sub>-Verminderung im Sektor private Haushalte*, Technische Universität München. URN: <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1525924/document.pdf>

- Cooremans 2012** Cooremans, Catherine, 2012. Investment in energy efficiency: do the characteristics of investments matter?  
*Energy Efficiency* **5** (4), S. 497–518  
DOI: 10.1007/s12053-012-9154-x
- Daniel R. Hill 2019** Daniel R. Hill, 2019. *Energy Efficiency Financing: A review of risks and uncertainties*: 16th IAEE European Conference: Energy Challenges for the Next  
DOI: 10.13140/RG.2.2.16639.97447
- Dehning 2017** Dehning, Patrick, 2017. *Steigerung der Energieeffizienz von Fabriken der Automobilproduktion*.  
Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.  
ISBN 978-3-658-19097-2  
DOI: 10.1007/978-3-658-19098-9
- Diakaki et al. 2010** Diakaki, Christina; Grigoroudis, Evangelos; Kabelis, Nikos; Kolokotsa, Dionyssia; Kalaitzakis, Kostas; Stavarakakis, George, 2010. A multi-objective decision model for the improvement of energy efficiency in buildings.  
*Energy* **35** (12), S. 5483–5496  
DOI: 10.1016/j.energy.2010.05.012
- Dierolf et al. 2021** Dierolf, Christian; Sauer, Alexander, 2021. Methoden zur Erkennung von Druckluftleckagen/Automated detection of compressed air leaks.  
*wt Werkstattstechnik online* **111** (01-02), S. 37–43  
DOI: 10.37544/1436-4980-2021-01-02-41
- DIN EN 16247-1** DIN EN 16247-1:2012-01.  
*DIN EN 16247-1: Energieaudits – Teil 1: Allgemeine Anforderungen*
- DIN EN ISO 50001** DIN EN ISO 50001:2018-12.  
*DIN EN ISO 50001: Energiemanagement – Anforderungen mit Anleitung zur Anwendung*
- DIN ISO 31000** DIN ISO 31000:2018-10.  
*DIN ISO 31000: Risikomanagement*

- 
- Dinkelbach et al. 1996** Dinkelbach, Werner; Kleine, Andreas, 1996. *Elemente einer betriebswirtschaftlichen Entscheidungslehre: Mit 26 Tabellen*. Berlin: Springer Verlag. ISBN 3540615695
- Domschke et al. 2015** Domschke, Wolfgang; Drexl, Andreas; Klein, Robert; Scholl, Armin, 2015. *Einführung in Operations Research*. 9., überarbeitete und verbesserte Auflage 2015. Berlin, Heidelberg: Springer Gabler. ISBN 9783662482162 DOI: 10.1007/978-3-662-48216-2
- Duić et al. 2015** Duić, Neven; Nedeljko, Štefanić; Zoran Lulić, 2015. *EU28 fuel prices for 2015, 2030 and 2050*. Verfügbar unter: [https://heatroadmap.eu/wp-content/uploads/2020/01/HRE4\\_D6.1-Future-fuel-price-review.pdf](https://heatroadmap.eu/wp-content/uploads/2020/01/HRE4_D6.1-Future-fuel-price-review.pdf) Zugriff am: 11.07.2022
- Dyckhoff 1994** Dyckhoff, Harald, 1994. *Betriebliche Produktion: Theoretische Grundlagen einer umweltorientierten Produktionswirtschaft*. Zweite, verbesserte Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer. ISBN 9783642579592 DOI: 10.1007/978-3-642-57959-2
- Ebert 2013** Ebert, Christof, 2013. *Risikomanagement kompakt: Risiken und Unsicherheiten bewerten und beherrschen*. 2., überarb. u. erw. Aufl. 2013. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg. Springer eBook Collection. ISBN 9783642410482 DOI: 10.1007/978-3-642-41048-2
- EDL-G 2010** EDL-G Gesetz über Energiedienstleistungen und andere Energieeffizienzmaßnahmen Verfügbar unter: [www.gesetze-im-internet.de/edl-g/](http://www.gesetze-im-internet.de/edl-g/) Zugriff am: 05.06.2022

- EEA 2022** EEA, 2022. *Trends and projections in Europe 2022*. Verfügbar unter: <https://www.eea.europa.eu/publications/trends-and-projections-in-europe-2022>  
Zugriff am: 10.02.2023
- EEP 2017** EEP, 2017. *Energieeffizienz-Index Sommer 2017*. Verfügbar unter: [www.eep.uni-stuttgart.de/eei/archiv-aeltere-erhebungen/](http://www.eep.uni-stuttgart.de/eei/archiv-aeltere-erhebungen/)  
Zugriff am: 22.04.2022
- EEP 2020** EEP, 2020. *Energieeffizienz-Index Winter 2020*. Verfügbar unter: [www.eep.uni-stuttgart.de/eei/archiv-aeltere-erhebungen/](http://www.eep.uni-stuttgart.de/eei/archiv-aeltere-erhebungen/)  
Zugriff am: 22.04.2022
- Eisenführ et al. 2003** Eisenführ, Franz; Weber, Martin, 2003. *Rationales Entscheiden*. Vierte, neu bearbeitete Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer. Springer-Lehrbuch. ISBN 9783662096680  
DOI: 10.1007/978-3-662-09668-0
- Ermschel 2013** Ermschel, Ulrich, 2013. *Investition und Finanzierung*. 3., durchges. und korr. Aufl. 2013. Berlin, Heidelberg: Springer Gabler. Springer eBook Collection. ISBN 9783642322662  
DOI: 10.1007/978-3-642-32266-2
- Eskander et al. 2017** Eskander, Monica M; Sandoval-Reyes, M; Silva, Carlos A; Vieira, S. M; Sousa, João M.C., 2017. Assessment of energy efficiency measures using multi-objective optimization in Portuguese households. *Sustainable Cities and Society* **35**, S. 764–773  
DOI: 10.1016/j.scs.2017.09.032

- Flatau 2019** Flatau, Roman, 2019. *Integrierte Bewertung interdependenter Energieeffizienzmaßnahmen: eine modellgestützte Analyse am Beispiel von Querschnittstechnologien*. Forschungsbericht / Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung;141 Stuttgart, Universität, Dissertation, 2019  
DOI: 10.18419/OPUS-10707
- Fleiter 2013** Fleiter, Tobias (Hrsg.), 2013. *Energieverbrauch und CO<sub>2</sub>-Emissionen industrieller Prozesstechnologien: Einsparpotenziale, Hemmnisse und Instrumente*. Stuttgart: Fraunhofer-Verlag.  
ISBN 9783839605158
- Fleiter et al. 2012a** Fleiter, Tobias; Hirzel, Simon; Worrell, Ernst, 2012. The characteristics of energy-efficiency measures – a neglected dimension. *Energy Policy* **51**, S. 502–513  
DOI: 10.1016/j.enpol.2012.08.054
- Forouli et al. 2019** Forouli, Aikaterini; Gkonis, Nikolaos; Nikas, Alexandros; Siskos, Eleftherios; Doukas, Haris; Tourkolias, Christos, 2019. Energy efficiency promotion in Greece in light of risk: Evaluating policies as portfolio assets. *Energy* **170**, S. 818–831  
DOI: 10.1016/j.energy.2018.12.180
- Gal 1991** Gal, Tomas (Hrsg.), 1991. *Grundlagen des Operations Research: 1 Einführung, Lineare Optimierung, Nichtlineare Optimierung, Optimierung bei mehrfacher Zielsetzung*. Dritte, durchgesehene Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.  
ISBN 9783642768446  
DOI: 10.1007/978-3-642-76844-6
- Geldermann 2006** Geldermann, Jutta, 2006. *Mehrzielentscheidungen in der industriellen Produktion*. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing  
DOI: 10.5445/KSP/1000004375

- Gerarden et al. 2017** Gerarden, Todd D; Newell, Richard G; Stavins, Robert N., 2017. Assessing the Energy-Efficiency Gap. *Journal of Economic Literature* **55** (4), S. 1486–1525  
DOI: 10.1257/jel.20161360
- Gleich 2014** Gleich, Ronald, 2014. *Energiecontrolling*. München: Haufe Lexware Verlag.  
Haufe Fachbuch v.1496.  
ISBN 9783648049457
- Gleißner et al. 2019** Gleißner, Werner; Wolfrum, Marco, 2019. *Risikoaggregation und Monte-Carlo-Simulation: Schlüsseltechnologie für Risikomanagement und Controlling*. Wiesbaden: Springer.  
ISBN 3658242736
- Göbel 2014** Göbel, Elisabeth, 2014. *Entscheidungen in Unternehmen*. Konstanz: UVK-Verl.-Ges.  
Unternehmensführung 8563.  
ISBN 9783825285630
- Götze 2014** Götze, Uwe, 2014. *Investitionsrechnung: Modelle und Analysen zur Beurteilung von Investitionsvorhaben*. 7. Aufl. Berlin: Springer Gabler.  
ISBN 9783642546228  
DOI: 10.1007/978-3-642-54622-8
- Grabe et al. 2014** Grabe, Jürgen; Däumler, Klaus-Dieter, 2014. *Grundlagen der Investitions- und Wirtschaftlichkeitsrechnung: Aufgaben und Lösungen, Testklausur, Checklisten, Tabellen für die finanzmathematischen Faktoren*. 13., vollst. überarb. Aufl. Herne: NWB-Verl.  
NWB Studium Betriebswirtschaft.  
ISBN 3482523037
- Greene et al. 2011** Greene, Randal; Devillers, Rodolphe; Luther, Joan E; Eddy, Brian G., 2011. GIS-Based Multiple-Criteria Decision Analysis. *Geography Compass* **5** (6), S. 412–432  
DOI: 10.1111/j.1749-8198.2011.00431.x

- Haag 2013** Haag, Holger (Hrsg.), 2013. *Eine Methodik zur modellbasierten Planung und Bewertung der Energieeffizienz in der Produktion*. Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung 11  
Stuttgart: Fraunhofer Verlag.  
Stuttgart, Universität, Dissertation, 2013  
ISBN 9783839605479
- Harris et al. 2000** Harris, Jane; Anderson, Jane; Shafron, Walter, 2000. Investment in energy efficiency: a survey of Australian firms.  
*Energy Policy* **28** (12), S. 867–876
- Hauptmanns 1987** Hauptmanns, Ulrich, 1987. *Technische Risiken: Ermittlung und Beurteilung*.  
Berlin, Heidelberg: Springer Berlin/Heidelberg.  
ISBN 9783662102633  
DOI: 10.1007/978-3-662-10262-6
- He et al. 2019** He, Yong; Liao, Nuo; Bi, Jiajing; Guo, Liwei, 2019. Investment decision-making optimization of energy efficiency retrofit measures in multiple buildings under financing budgetary restraint.  
*Journal of Cleaner Production* **215**, S. 1078–1094  
DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.01.119
- Heesen 2010** Heesen, Bernd, 2010. *Investitionsrechnung für Praktiker: Fallorientierte Darstellung der Verfahren und Berechnungen*.  
1. Aufl.  
Wiesbaden: Gabler.  
ISBN 9783834920935
- Heo et al. 2011** Heo, Y; Augenbroe, G; Choudhary, R., 2011. Risk analysis of energy-efficiency projects based on bayesian calibration of building energy models.  
*Proceedings of Building Simulation*, S. 2579–2586
- Hevner et al. 2004** Hevner; March; Park; Ram, 2004. Design Science in Information Systems Research.  
*MIS Quarterly* **28** (1), S. 75  
DOI: 10.2307/25148625

- Hillier et al. 2015** Hillier, Frederick S; Lieberman, Gerald J., 2015. *Introduction to operations research*. 10. Ausgabe. New York, NY: McGraw-Hill Education. ISBN 9780073523453
- Hirzel 2015** Hirzel, Simon, 2015. *Analyse und Bewertung industrieller Energieeffizienzmaßnahmen: Ein multikriterieller Ansatz für Gruppenentscheidungen unter Unsicherheit dargestellt am Beispiel von Druckluftsystemen* Fortschritt-Berichte VDI. Reihe 15, Umwelttechnik Nr. 257. Düsseldorf: VDI Verlag. Aachen, Technische Hochschule, Dissertation, 2015 ISBN 9783183257157
- Hodgkinson 2008** Hodgkinson, Gerard P. (Hrsg.), 2008. *The Oxford handbook of organizational decision making*. Oxford, New York, NY: Oxford Univ. Press. ISBN 9780199290468 DOI: 10.1093/oxfordhb/9780199290468.001.0001
- Hwang 1981** Hwang, Ching-Lai, 1981. *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications A State-of-the-Art Survey*. Berlin, Heidelberg: Springer. Springer eBook Collection 186. ISBN 9783642483189 DOI: 10.1007/978-3-642-48318-9
- IEA 2014** IEA, 2014. *Capturing the Multiple Benefits of Energy Efficiency*. Verfügbar unter: [https://iea.blob.core.windows.net/assets/28f84ed8-4101-4e95-ae51-9536b6436f14/Multiple\\_Benefits\\_of\\_Energy\\_Efficiency-148x199.pdf](https://iea.blob.core.windows.net/assets/28f84ed8-4101-4e95-ae51-9536b6436f14/Multiple_Benefits_of_Energy_Efficiency-148x199.pdf) Zugriff am: 10.02.2023
- IEA 2021** IEA, 2021. *Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector*. Verfügbar unter: <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050> Zugriff am: 10.02.2023



- IPCC 2022** IPCC, 2022. *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change*, Working Group III Contribution to the Sixth Assessment Report.  
Verfügbar unter:  
[https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_WGIII\\_FullReport.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_FullReport.pdf)  
Zugriff am: 10.02.2023
- Ishizaka 2013** Ishizaka, Alessio, 2013. *Multi-criteria decision analysis: Methods and software*.  
Chichester, West Sussex, United Kingdom: Wiley.  
ISBN 1118644913  
DOI: 10.1002/9781118644898
- Jackson 2010** Jackson, Jerry, 2010. Promoting energy efficiency investments with risk management decision tools. *Energy Policy* **38** (8), S. 3865–3873  
DOI: 10.1016/j.enpol.2010.03.006
- Jaffe et al. 1994** Jaffe, Adam B; Stavins, Robert N., 1994. The energy-efficiency gap What does it mean? *Energy Policy* **22** (10), S. 804–810  
DOI: 10.1016/0301-4215(94)90138-4
- Karmellos et al. 2015** Karmellos, M; Kiprakis, A; Mavrotas, G., 2015. A multi-objective approach for optimal prioritization of energy efficiency measures in buildings: Model, software and case studies. *Applied Energy* **139**, S. 131–150
- Keen 1987** Keen, Peter G.W., 1987. Decision support systems: The next decade. *Decision Support Systems* **3** (3), S. 253–265  
DOI: 10.1016/0167-9236(87)90180-1
- Keeney 1992** Keeney, Ralph L., 1992. *Value-focused thinking: A path to creative decisionmaking*.  
Cambridge, Mass: Harvard University Press.  
ISBN 0674039408
- Killip et al. 2019** Killip, Gavin; Fawcett, Tina; Cooremans, Catherine; Krishnan, Subramani; Voswinkel, Fabian, 2019. *Multiple benefits of energy efficiency at the firm level: a literature review*. Eceee Summer Study Proceeding

- Kontogiorgos et al. 2018** Kontogiorgos, Panagiotis; Chrysanthopoulos, Nikolaos; Papavassilopoulos, George, 2018. A Mixed-Integer Programming Model for Assessing Energy-Saving Investments in Domestic Buildings under Uncertainty. *Energies* **11** (4), S. 989  
DOI: 10.3390/en11040989
- Korhonen et al.** Korhonen, Pekka; Wallenius, Jyrki, 2001. On Using the AHP in Multiple Objective Linear Programming. In: Schmoldt, Daniel L; Kangas, Jyrki; Mendoza, Guillermo A; Pesonen, Mauno (Hrsg.): *The Analytic Hierarchy Process in Natural Resource and Environmental Decision Making*. Dordrecht, s.l.: Springer Netherlands, S. 37–50  
ISBN 978-90-481-5735-8  
DOI: 10.1007/978-94-015-9799-9\_3
- Koutsandreas et al. 2022** Koutsandreas, Diamantis; Kleanthis, Nikos; Flamos, Alexandros; Karakosta, Charikleia; Doukas, Haris, 2022. Risks and mitigation strategies in energy efficiency financing: A systematic literature review. *Energy Reports* **8**, S. 1789–1802  
DOI: 10.1016/j.egy.2022.01.006
- Kräkel 2007** Kräkel, Matthias, 2007. *Organisation und Management*. 3., überarb. und erw. Aufl. Tübingen: Mohr Siebeck. Neue ökonomische Grundrisse. ISBN 9783161492587
- Laux 2014** Laux, 2014. *Entscheidungstheorie*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. ISBN 978-3-642-55257-1  
DOI: 10.1007/978-3-642-55258-8
- Le Wang et al. 2020** Le Wang; Zhang, Hong-Yu; Wang, Jian-Qiang; Wu, Guo-Fang, 2020. Picture fuzzy multi-criteria group decision-making method to hotel building energy efficiency retrofit project selection. *RAIRO - Operations Research* **54** (1), S. 211–229  
DOI: 10.1051/ro/2019004

- Leigh et al. 2006** Leigh, Buchanan; Andrew, O'Connell, 2006. A brief history of decision making. *Harvard business review* **84**, 32-41
- Li et al. 2022** Li, Xiang; Liu, Sha; Sun, Yichao, 2022. A GP-Based Hierarchical Objectives Decision-Making Method for Building Energy Efficiency Optimization. *Buildings* **12** (1), S. 52  
DOI: 10.3390/buildings12010052
- Liebl 2019** Liebl, Corinna Beate, 2019. *Systematische Energiedatenerfassung in der Produktion*. München, Technische Universität, Dissertation, 2019  
URN: <https://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn:nbn:de:bvb:91-diss-20191217-1506508-1-8>
- Löbbe et al. 2019** Löbbe, Sabine; König, Werner; Büttner, Stefan; Schneider, Christian, 2019. *Entscheidung für Energieeffizienz: Auswirkungen von Kultur, Verhalten und Technikdiffusion in produzierenden KMU in Baden-Württemberg*: Hochschule Reutlingen  
DOI: 10.34645/OPUS-2093
- Loureiro et al. 2020** Loureiro, Tatiana; Gil, Marta; Desmaris, Rachel; Andaloro, Annalisa; Karakosta, Charikleia; Plesser, Stefan, 2020. De-Risking Energy Efficiency Investments through Innovation. *Proceedings* **65** (1), S. 3  
DOI: 10.3390/proceedings2020065003
- Loureiro et al. 2021** Loureiro, Tatiana; Pozza, Cristian; Mexis, Filippos Dimitrios; Olivero, Sergio; Csiky, Csaba de; Bogi, Andrea, 2021. Integration of Finance in Energy Efficiency. *Environmental Sciences Proceedings* **11** (1), S. 7  
DOI: 10.3390/environsciproc2021011007
- Malatji et al. 2013** Malatji, Esrom Mahlatsi; Zhang, Jiangfeng; Xia, Xiaohua, 2013. A multiple objective optimisation model for building energy efficiency investment decision. *Energy and Buildings* **61**, S. 81–87  
DOI: 10.1016/j.enbuild.2013.01.042

- 
- Meyer 2000** Meyer, Roswitha, 2000. *Entscheidungstheorie: Ein Lehr- und Arbeitsbuch*. 2., durchgesehene Auflage. Wiesbaden: Gabler Verlag. ISBN 9783322920447 DOI: 10.1007/978-3-322-92044-7
- Mikučionienė et al. 2014** Mikučionienė, Rūta; Martinaitis, Vytautas; Keras, Eugenijus, 2014. Evaluation of energy efficiency measures sustainability by decision tree method. *Energy and Buildings* **76**, S. 64–71 DOI: 10.1016/j.enbuild.2014.02.048
- Mokhtar et al. 2020** Mokhtar, Alireza; Nasooti, Mohsen, 2020. A decision support tool for cement industry to select energy efficiency measures. *Energy Strategy Reviews* **28**, S. 100458 DOI: 10.1016/j.esr.2020.100458
- Mühlbacher et al. 2013** Mühlbacher, Axel C; Kaczynski, Anika, 2013. Der Analytic Hierarchy Process (AHP): Eine Methode zur Entscheidungsunterstützung im Gesundheitswesen. *PharmacoEconomics German Research Articles* **11** (2), S. 119–132 DOI: 10.1007/s40275-014-0011-8
- Müller et al. 2009** Müller, Egon; Engelmann, Jörg; Löffler, Thomas; Strauch, Jörg, 2009. *Energieeffiziente Fabriken planen und betreiben*. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag Berlin Heidelberg. ISBN 9783540896449 DOI: 10.1007/978-3-540-89644-9
- Nair et al. 2010** Nair, Gireesh; Gustavsson, Leif; Mahapatra, Krushna, 2010. Factors influencing energy efficiency investments in existing Swedish residential buildings. *Energy Policy* **38** (6), S. 2956–2963 DOI: 10.1016/j.enpol.2010.01.033
- Nehler 2016** Nehler, Therese, 2016. *The Non-Energy Benefits of Industrial Energy Efficiency: Investments and Measures*. Linköping University Electronic Press. ISBN 9789176856727 DOI: 10.3384/lic.diva-131831

- Nehler et al. 2016** Nehler, Therese; Rasmussen, Josefine, 2016. How do firms consider non-energy benefits? Empirical findings on energy-efficiency investments in Swedish industry. *Journal of Cleaner Production* **113**, S. 472–482  
DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.11.070
- Neugebauer 2014** Neugebauer, Reimund, 2014. *Handbuch ressourcenorientierte Produktion*. München: Hanser.  
ISBN 9783446436237  
DOI: 10.3139/9783446436237
- Neugebauer et al. 2010** Neugebauer, Reimund; Rennau, Anett; Schönherr, Julia; Fischer, Susanne; Schellenberger, Sandy, 2010. Energieeffizienzmaßnahmen. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* **105** (9), S. 796–801  
DOI: 10.3139/104.110381
- Neumann et al. 2004** Neumann, Klaus; Morlock, Martin, 2004. *Operations Research*. 2. Aufl. München, Wien: Hanser.  
ISBN 3446221409
- Neumann et al. 2007** Neumann, John von; Morgenstern, Oskar, 2007. *Theory of games and economic behavior*. 60th anniversary ed. Princeton: Princeton University Press. Princeton classic editions.  
ISBN 0691130612  
DOI: 10.2307/j.ctt1r2gkx
- Neves et al. 2008** Neves, Luís Pires; Martins, António Gomes; Antunes, Carlos Henggeler; Dias, Luís Cândido, 2008. A multi-criteria decision approach to sorting actions for promoting energy efficiency. *Energy Policy* **36** (7), S. 2351–2363  
DOI: 10.1016/j.enpol.2007.11.032

- Nicolosi et al. 2021** Nicolosi, Marco; Burstedde, Barbara, 2021. *Transformation of the power market by 2050 - options for a market design with high shares of renewable energies. Final report.* Umweltbundesamt (UBA)  
Verfügbar unter:  
<https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/strommarkt-klimaschutz-transformation-der>  
Zugriff am: 08.07.2022
- Nissen 2018** Nissen, Ulrich, 2018. *Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen nach ihrem Beitrag zur Steigerung des Unternehmenswertes.*  
Verfügbar unter:  
[https://www.effizienznetzwerke.org/app/uploads/2015/06/Wertsteigerung\\_EnKoMa-DIALOG.pdf](https://www.effizienznetzwerke.org/app/uploads/2015/06/Wertsteigerung_EnKoMa-DIALOG.pdf)  
Zugriff am: 08.07.2022
- Patzak 1982** Patzak, Gerold, 1982. *Systemtechnik – Planung komplexer innovativer Systeme: Grundlagen, Methoden, Techniken.*  
Berlin: Springer.  
ISBN 978-3-540-11783-4  
DOI: 10.1007/978-3-642-81893-6
- Pawellek 2014** Pawellek, Günther, 2014. *Ganzheitliche Fabrikplanung: Grundlagen, Vorgehensweise, EDV-Unterstützung.* 2nd ed.  
Berlin, Heidelberg: Springer Berlin/Heidelberg.  
VDI-Buch Ser.  
ISBN 9783662437285
- Peppers et al. 2007** Peppers, Ken; Tuunanen, Tuure; Rothenberger, Marcus A; Chatterjee, Samir, 2007. A Design Science Research Methodology for Information Systems Research. *Journal of Management Information Systems* **24** (3), S. 45–77  
DOI: 10.2753/MIS0742-1222240302
- Pehnt 2010** Pehnt, Martin (Hrsg.), 2010. *Energieeffizienz: Ein Lehr- und Handbuch.* 1., korrigierter Nachdr.  
Berlin: Springer.  
ISBN 9783642142505

- Penna et al. 2015** Penna, Paola; Prada, Alessandro; Cappelletti, Francesca; Gasparella, Andrea, 2015. Multi-objectives optimization of Energy Efficiency Measures in existing buildings.  
*Energy and Buildings* **95**, S. 57–69  
DOI: 10.1016/j.enbuild.2014.11.003
- Peters et al. 2007** Peters, Malte L; Zelewski, Stephan, 2007. TOPSIS als Technik zur Effizienzanalyse.  
*Wirtschaftswissenschaftliches Studium* **36** (1), S. 9–15
- Pinnells 2009** Pinnells, James R., 2009. *Risikomanagement in Projekten*.  
Wiesbaden: Springer Fachmedien.  
ISBN 9783834901255
- Poggensee 2011** Poggensee, Kay, 2011. *Investitionsrechnung: Grundlagen – Aufgaben – Lösungen*.  
2., überarbeitete Auflage.  
Wiesbaden: Gabler Verlag.  
SpringerLink Bücher.  
ISBN 9783834930149  
DOI: 10.1007/978-3-8349-6798-5
- Pokorádi 2010** Pokorádi, László, 2010. Application of Fuzzy Set Theory for Risk Assessment.  
*Journal of Konbin* **14-15** (23), S. 187–196  
DOI: 10.2478/v10040-008-0177-5
- Rasmussen 2017** Rasmussen, Josefine, 2017. The additional benefits of energy efficiency investments—a systematic literature review and a framework for categorisation.  
*Energy Efficiency* **10** (6), S. 1401–1418
- Ramanathan et al. 1995** Ramanathan, R; Ganesh, L. S., 1995. Using AHP for resource allocation problems.  
*European Journal of Operational Research* **80** (2), S. 410–417  
DOI: 10.1016/0377-2217(93)E0240-X

- Rao 2007** Rao, R. Venkata, 2007. *Decision Making in the Manufacturing Environment: Using Graph Theory and Fuzzy Multiple Attribute Decision Making Methods*. London: Springer London. SpringerLink Bücher. ISBN 9781846288197 DOI: 10.1007/978-1-84628-819-7
- Rebhan 2002** Rebhan, Eckhard (Hrsg.), 2002. *Energiehandbuch: Gewinnung, Wandlung und Nutzung von Energie*. Berlin, Heidelberg, s.l.: Springer Berlin Heidelberg. ISBN 9783642554513 DOI: 10.1007/978-3-642-55451-3
- Ribas et al. 2015** Ribas, José Roberto; da Silva Rocha, Mariana, 2015. A Decision Support System for Prioritizing Investments in an Energy Efficiency Program in Favelas in the City of Rio de Janeiro. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis* **22** (1-2), S. 89–99 DOI: 10.1002/mcda.1524
- Richtlinie 2012/27/EU 2012** Richtlinie 2012/27/EU *Richtlinie 2012/27/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 25. Oktober 2012 zur Energieeffizienz, zur Änderung der Richtlinien 2009/125/EG und 2010/30/EU und zur Aufhebung der Richtlinien 2004/8/EG und 2006/32/EG Text von Bedeutung für den EWR* Verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/ALL/?uri=celex:32012L0027> Zugriff am: 29.10.2022
- Rohdin et al. 2006** Rohdin, Patrik; Thollander, Patrik, 2006. Barriers to and driving forces for energy efficiency in the non-energy intensive manufacturing industry in Sweden. *Energy* **31** (12), S. 1836–1844 DOI: 10.1016/j.energy.2005.10.010
- Rohdin et al. 2007** Rohdin, Patrik; Thollander, Patrik; Solding, Petter, 2007. Barriers to and drivers for energy efficiency in the Swedish foundry industry. *Energy Policy* **35** (1), S. 672–677 DOI: 10.1016/j.enpol.2006.01.010



**Rohrschneider 2006**

Rohrschneider, Uwe, 2006. *Risikomanagement in Projekten: Die häufigsten Fallen und Gefahren – die besten Sofortmaßnahmen*.

1. Auflage.

München: Rudolf Haufe Verlag.

ISBN 9783448068191

**Romeike 2003**

Romeike, Frank (Hrsg.), 2003. *Erfolgsfaktor Risiko-Management: Chance Für Industrie und Handel Methoden, Beispiele, Checklisten*.

Wiesbaden: Springer Gabler. Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH.

ISBN 9783663057154

DOI: 10.1007/978-3-663-05715-4

**Romeike 2018**

Romeike, Frank, 2018. *Risikomanagement*.

Wiesbaden: Springer Gabler.

SpringerLink Bücher.

ISBN 9783658139520

DOI: 10.1007/978-3-658-13952-0

**Rommelfanger et al. 2002**

Rommelfanger, Heinrich J; Eickemeier, Susanne H., 2002. *Entscheidungstheorie: Klassische Konzepte und Fuzzy-Erweiterungen*.

Berlin, Heidelberg: Springer.

Springer-Lehrbuch.

ISBN 9783642562525

DOI: 10.1007/978-3-642-56252-5

**Ropohl 2009**

Ropohl, Günter, 2009. *Allgemeine Technologie: eine Systemtheorie der Technik*.

Karlsruhe: KIT Scientific Publishing

DOI: 10.5445/KSP/1000011529

**Runkler 1997**

Runkler, T. A., 1997. Selection of appropriate defuzzification methods using application specific properties.

*IEEE Transactions on Fuzzy Systems* **5** (1), S. 72–79

DOI: 10.1109/91.554449

- Runzheimer 1998** Runzheimer, Bodo, 1998. *Investitionsentscheidungen in der Praxis: Quantitative Methoden als Entscheidungshilfen*. Wiesbaden: Springer Gabler. Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH. Springer eBook Collection Business and Economics. ISBN 9783322845177  
DOI: 10.1007/978-3-322-84517-7
- Saaty 1987** Saaty, R. W., 1987. The analytic hierarchy process – what it is and how it is used. *Mathematical Modelling* **9** (3-5), S. 161–176  
DOI: 10.1016/0270-0255(87)90473-8
- Saaty et al. 2007** Saaty, Thomas L; Peniwati, Kirti; Shang, Jen S., 2007. The analytic hierarchy process and human resource allocation: Half the story. *Mathematical and Computer Modelling* **46** (7-8), S. 1041–1053  
DOI: 10.1016/j.mcm.2007.03.010
- Schenk et al. 2004** Schenk, Michael; Wirth, Siegfried, 2004. *Fabrikplanung und Fabrikbetrieb: Methoden für die wandlungsfähige und vernetzte Fabrik*. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag Berlin Heidelberg. ISBN 3540204237  
DOI: 10.1007/3-540-35046-2
- Schenk et al. 2014** Schenk, Michael; Wirth, Siegfried; Müller, Egon, 2014. *Fabrikplanung und Fabrikbetrieb: Methoden für die wandlungsfähige, vernetzte und ressourceneffiziente Fabrik*. 2., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage 2014. Berlin: Springer Vieweg. VDI-Buch. ISBN 9783642054594  
DOI: 10.1007/978-3-642-05459-4

- Schieberle 2019** Schieberle, Christian, 2019. *Development of a stochastic optimization approach to determine cost-efficient environmental protection strategies: case study of policies for the future European passenger transport sector with a focus on rail-bound and on-road activities.*  
Stuttgart, Universität, Dissertation, 2019  
DOI: 10.18419/OPUS-10473
- Schmid 2004** Schmid, Christiane, 2004. *Energieeffizienz in Unternehmen: Eine handlungstheoretische und wissensbasierte Analyse von Einflussfaktoren und Instrumenten*, Zürich, Diss., Eidgenössische Technische Hochschule ETH Zürich, Nr. 15398, 2004.  
Zürich: vdf Hochsch.-Verl. an der ETH.  
Wirtschaft, Energie, Umwelt.  
ISBN 3728129518  
DOI: 10.3929/ethz-a-004691310
- Schmidt-Bäumler 2020** Schmidt-Bäumler, Heike, 2020. *Multikriterielle Entscheidungsunterstützung in der risiko-basierten Instandhaltungsplanung am Beispiel der Verkehrswasserbauwerke.*  
Karlsruhe, Technische Hochschule, Dissertation, 2020  
DOI: 10.5445/IR/1000119906
- Schmidt-Sudhoff 1967** Schmidt-Sudhoff, Ulrich, 1967. *Unternehmerziele und Unternehmerisches Zielsystem.*  
Wiesbaden: Springer Gabler. in Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH.  
Betriebswirtschaftliche Beiträge Ser v.10.  
ISBN 9783663027485  
DOI: 10.1007/978-3-663-02748-5
- Schmigalla 1995** Schmigalla, Hans, 1995. *Fabrikplanung: Begriffe und Zusammenhänge.*  
1. Aufl.  
München: Hanser.  
REFA-Fachbuchreihe Betriebsorganisation.  
ISBN 3446185720

- Schneider et al. 2021** Schneider, Christian; Burkert, Melina; Weise, Patrik; Sauer, Alexander, 2021. Risikobewertung von Energieeffizienzmaßnahmen/Risk assessment of energy efficiency measures.  
*wt Werkstattstechnik online* **111** (01-02), S. 44–48  
DOI: 10.37544/1436-4980-2021-01-02-48
- Schnellbach 2016** Schnellbach, Peter, 2016. *Methodik zur Reduzierung von Energieverschwendung unter Berücksichtigung von Zielgrößen ganzheitlicher Produktionssysteme*. München: Herbert Utz Verlag GmbH.  
München, Technische Universität, Dissertation, 2016
- Schnorrenberg et al. 1997** Schnorrenberg, Uwe; Goebels, Gabriele, 1997. *Risikomanagement in Projekten: Methoden und ihre praktische Anwendung*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.  
Springer eBook Collection Computer Science and Engineering.  
ISBN 9783322830630  
DOI: 10.1007/978-3-322-83063-0
- Solmaz et al. 2018** Senel Solmaz, Aslihan; Halicioglu, Fahriye H; Gunhan, Suat, 2018. An approach for making optimal decisions in building energy efficiency retrofit projects.  
*Indoor and Built Environment* **27** (3), S. 348–368  
DOI: 10.1177/1420326X16674764
- Simon 1959** Simon, Herbert, 1959. Theories of Decision-Making in Economics and Behavioral Science.  
*The American Economic Review* **49** (3), S. 253–283
- Simon 1972** Simon, Herbert A., 1972. Theories of bounded rationality.  
*Decision and organization* **1** (1), S. 161–176
- Simon 1997** Simon, Herbert Alexander, 1997. *Administrative behavior: A study of decision-making processes in administrative organizations*. 4. Ausgabe.  
New York, NY: Free Press.  
ISBN 0684835827

- Sorrell et al. 2000** Sorrell, S; Schleich, J; Scott, S; O'Malley, E; Trace, F; Böde, U; Köwener, D; Mannsbart, W; Ostertag, K; Radgen, P., 2000. *Reducing barriers to energy efficiency in private and public organisations. Final Report*.  
Sussex: SPRU, Sussex.  
European Commission – Non Nuclear Energy  
Programme: Joule III JOS3CT970022
- Stevens et al. 2018** Stevens, Donald; Fuerst, Franz; Adan, Hassan; Brounen, Dirk; Kavarnou, Dimitra; Singh, Ramandeep (Hrsg.), 2018. *Risks and Uncertainties Associated with Residential Energy Efficiency Investments*  
DOI: 10.2139/ssrn.3254854
- Sztubecka et al. 2020** Sztubecka, Małgorzata; Skiba, Marta; Mrówczyńska, Maria; Bazan-Krzywoszańska, Anna, 2020. An Innovative Decision Support System to Improve the Energy Efficiency of Buildings in Urban Areas.  
*Remote Sensing* **12** (2), S. 259  
DOI: 10.3390/rs12020259
- Taleb et al. 2009** Taleb, Nassim; Goldstein, Daniel; Spitznagel, Mark, 2009. The Six Mistakes Executives Make in Risk Management.  
*Harvard business review* **87**, S. 81
- Tallini et al. 2016** Tallini, Alessandro; Cedola, Luca, 2016. Evaluation Methodology for Energy Efficiency Measures in Industry and Service Sector.  
*Energy Procedia* **101**, S. 542–549  
DOI: 10.1016/j.egypro.2016.11.069
- Tan et al. 2016** Tan, Barış; Yavuz, Yahya; Otay, Emre N; Çamlıbel, Emre, 2016. Optimal selection of energy efficiency measures for energy sustainability of existing buildings.  
*Computers & Operations Research* **66**, S. 258–271  
DOI: 10.1016/j.cor.2015.01.013
- Taylan et al. 2016** Taylan, Osman; Kaya, Durmus; Demirbas, Ayhan, 2016. An integrated multi attribute decision model for energy efficiency processes in petrochemical industry applying fuzzy set theory.  
*Energy Conversion and Management* **117**, S. 501–512  
DOI: 10.1016/j.enconman.2016.03.048

- TerHorst 1980** TerHorst, Klaus W., 1980. *Investitionsplanung*. Stuttgart: Kohlhammer. Urban-Taschenbücher 276. ISBN 3170053086
- Thiede 2012** Thiede, Sebastian, 2012. *Energy Efficiency in Manufacturing Systems*. Berlin: Springer. ISBN 978-3-642-25913-5 DOI: 10.1007/978-3-642-25914-2
- Thollander et al. 2008** Thollander, Patrik; Ottosson, Mikael, 2008. An energy efficient Swedish pulp and paper industry – exploring barriers to and driving forces for cost-effective energy efficiency investments. *Energy Efficiency* **1** (1), S. 21–34 DOI: 10.1007/s12053-007-9001-7
- Thommen et al. 2017** Thommen, Jean-Paul; Achleitner, Ann-Kristin; Gilbert, Dirk Ulrich; Hachmeister, Dirk; Kaiser, Gernot, 2017. *Allgemeine Betriebswirtschaftslehre*. 8., vollständig überarbeitete Auflage. Wiesbaden: Springer Gabler. ISBN 9783658077679 DOI: 10.1007/978-3-658-07768-6
- Thompson 1997** Thompson, Philip B., 1997. Evaluating energy efficiency investments: accounting for risk in the discounting process. *Energy Policy* **25** (12), S. 989–996 DOI: 10.1016/S0301-4215(97)00125-0
- Togashi 2018** Togashi, Eisuke, 2018. Risk analysis of energy efficiency investments in buildings using the Monte Carlo method. *Journal of Building Performance Simulation* **12** (4), S. 504–522 DOI: 10.1080/19401493.2018.1523949
- Tomczak 1992** Tomczak, Torsten, 1992. Forschungsmethoden in der Marketingwissenschaft. Ein Plädoyer für den qualitativen Forschungsansatz. *Marketing ZFP* **14** (2), S. 77–87 DOI: 10.15358/0344-1369-1992-2-77

- Töppel et al. 2019** Töppel, Jannick; Tränkler, Timm, 2019. Modeling energy efficiency insurances and energy performance contracts for a quantitative comparison of risk mitigation potential.  
*Energy Economics* **80**, S. 842–859  
DOI: 10.1016/j.eneco.2019.01.033
- Trautmann 2006** Trautmann, Siegfried, 2006. *Investitionen: Bewertung, Auswahl und Risikomanagement*.  
Berlin, Heidelberg: Springer.  
Springer-Lehrbuch.  
ISBN 3540258035
- Trianni et al. 2014** Trianni, Andrea; Cagno, Enrico; Donatis, Alessio de, 2014. A framework to characterize energy efficiency measures.  
*Applied Energy* **118**, S. 207–220  
DOI: 10.1016/j.apenergy.2013.12.042
- Üçtuğ et al. 2012** Üçtuğ, Fehmi Görkem; Yükseltan, Ergün, 2012. A linear programming approach to household energy conservation: Efficient allocation of budget.  
*Energy and Buildings* **49**, S. 200–208  
DOI: 10.1016/j.enbuild.2012.02.020
- Umweltbundesamt 2022a** Umweltbundesamt, 2022. *Europäische Energie- und Klimaziele*.  
Verfügbar unter:  
<https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/europaeische-energie-klimaziele>  
Zugriff am: 10.02.2023
- Umweltbundesamt 2022b** Umweltbundesamt, 2022. *Strom- und Wärmeversorgung in Zahlen*.  
Verfügbar unter:  
<https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/energieversorgung/strom-waermeversorgung-in-zahlen#Kraftwerke>  
Zugriff am: 19.02.2023
- Ulrich 1982** Ulrich, Hans, 1982. Anwendungsorientierte Wissenschaft.  
*Die Unternehmung: Swiss journal of business research and practice; Organ der Schweizerischen Gesellschaft für Betriebswirtschaft (SGB)* (Vol. 36.1982), S. 1–10

- Ulrich et al. 1979** Ulrich, Hans; Hill, Wilhelm, 1979. Wissenschaftstheoretische Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre. In: Raffée, Hans; Abel, Bodo (Hrsg.): *Wissenschaftstheoretische Grundfragen der Wirtschaftswissenschaften*. München: Vahlen ISBN 3800607727
- VDI 4433** VDI 4433 Blatt 1:2010-01. *VDI 4433 Blatt 1: Investitionsplanung und Investitionsstudien*
- VDI 5200** VDI 5200-1:2009-01:2009-01. *VDI 5200-1: Fabrikplanung – Planungsvorgehen*
- Venable et al. 2017** Venable, John R; Pries-Heje, Jan; Baskerville, Richard L., 2017. *Choosing a Design Science Research Methodology*. Verfügbar unter: <https://aisel.aisnet.org/acis2017/112> Zugriff am: 23.10.2022
- Wälder 2017** Wälder, Konrad, 2017. *Methoden zur Risikomodellierung und des Risikomanagements*. Wiesbaden: Springer Vieweg. ISBN 9783658139735 DOI: 10.1007/978-3-658-13973-5
- Wang et al. 2017** Wang, Qinpeng; Lee, Benjamin D; Augenbroe, Godfried; Paredis, Christiaan J.J., 2017. An application of normative decision theory to the valuation of energy efficiency investments under uncertainty. *Automation in Construction* **73**, S. 78–87 DOI: 10.1016/j.autcon.2016.09.005
- Warnecke 1995** Warnecke, Hans-Jürgen, 1995. *Der Produktionsbetrieb 1: Organisation, Produkt, Planung*. Dritte, unveränderte Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer ISBN 9783642792397 DOI: 10.1007/978-3-642-79239-7



- 
- Weber 2019** Weber, Max, 2019. *Max Weber-Gesamtausgabe: Band I/17: Wissenschaft als Beruf 1917/1919 / Politik als Beruf 1919*.  
1. Auflage.  
Tübingen: Mohr Siebeck.  
Max Weber-Gesamtausgabe v.1.17.  
ISBN 9783161581373
- Weeber 2022** Weeber, Max (Hrsg.), 2022. *Simulation-based assessment of energy use in factories*: Stuttgart : Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA  
Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung 139.  
Stuttgart, Universität, Dissertation, 2022  
DOI: 10.18419/opus-12313
- Werner 1992** Werner, Lutz, 1992.  
*Entscheidungsunterstützungssysteme: Ein problem- und benutzerorientiertes Management-Instrument*.  
Heidelberg: Physica-Verlag.  
Handeln und Entscheiden in komplexen ökonomischen Situationen Ser v.5.  
ISBN 978-3-7908-0637-3
- Weskamp 2017** Weskamp, Markus (Hrsg.), 2017. *Modell zur Bewertung von Investitionen zur Steigerung der Ökoeffektivität innerbetrieblicher Wertschöpfungsketten*.  
Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung 75.  
Stuttgart: Fraunhofer Verlag.  
Stuttgart, Universität, Dissertation. 2017  
DOI: 10.18419/opus-9819
- Westkämper et al. 2006** Westkämper, Engelbert; Decker, Markus, 2006.  
*Einführung in die Organisation der Produktion*.  
Berlin, Heidelberg: Springer Verlag  
ISBN 9783540307648  
DOI: 10.1007/3-540-30764-8

- Westkämper et al. 2009** Westkämper, Engelbert; Zahn, Erich, 2009. *Wandlungsfähige Produktionsunternehmen: Das Stuttgarter Unternehmensmodell*. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag. ISBN 9783540688907  
DOI: 10.1007/978-3-540-68890-7
- Westphal 2016** Westphal, Daniel (Hrsg.), 2016. *Adaptive Verkürzung des Analytischen Hierarchie Prozesses zur rationalen Lösung multikriterieller Entscheidungsprobleme*. Berlin, Technische Universität, Dissertation, 2016  
DOI: 10.14279/depositonce-5524
- Wiendahl 1991** Wiendahl, Hans-Peter, 1991. *Analyse und Neuordnung der Fabrik*. Berlin, Heidelberg: Springer. CIM-Fachmann. ISBN 9783642956300  
DOI: 10.1007/978-3-642-95630-0
- Willeke 1998** Willeke, Andreas, 1998. Risikoanalyse in der Energiewirtschaft. *Schmalenbachs Zeitschrift für betriebswirtschaftliche Forschung* **50** (12), S. 1146–1164  
DOI: 10.1007/BF03371553
- Wißler 2006** Wißler, Frank Eugen, 2006. *Ein Verfahren zur Bewertung technischer Risiken in der Phase der Entwicklung komplexer Serienprodukte*, Stuttgart, Heimsheim: Univ; Jost-Jetter. IPA-IAO-Forschung und -Praxis 437. Stuttgart, Universität, Dissertation, 2006. ISBN 3936947864
- Wohlgenannt 1969** Wohlgenannt, Rudolf, 1969. *Was ist Wissenschaft?* Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag. Wissenschaftstheorie Wissenschaft und Philosophie 2. ISBN 9783322991614  
DOI: 10.1007/978-3-322-99161-4
- Worrell et al. 2009** Worrell, Ernst; Bernstein, Lenny; Roy, Joyashree; Price, Lynn; Harnisch, Jochen, 2009. Industrial energy efficiency and climate change mitigation. *Energy Efficiency* **2** (2), S. 109–123  
DOI: 10.1007/s12053-008-9032-8

- Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH 2018** Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH, 2018. *Erweiterung von Kosten-Nutzen-Analysen zu ausgewählten Energieeffizienzmaßnahmen um Erkenntnisse zum Markt für Energieeffizienzdienstleistungen und zum Aufwand von Investitionen in Energieeffizienz.* Verfügbar unter: [https://www.bfee-online.de/SharedDocs/Downloads/BfEE/DE/Energiedienstleistungen/studie\\_kostennutzen.html](https://www.bfee-online.de/SharedDocs/Downloads/BfEE/DE/Energiedienstleistungen/studie_kostennutzen.html) Zugriff am: 20.06.2022
- Yu et al. 2015** Yu, Wei; Li, Baizhan; Jia, Hongyuan; Zhang, Ming; Di Wang, 2015. Application of multi-objective genetic algorithm to optimize energy efficiency and thermal comfort in building design. *Energy and Buildings* **88**, S. 135–143  
DOI: 10.1016/j.enbuild.2014.11.063
- Zahn et al. 1996** Zahn, Erich; Schmid, Uwe, 1996. *Grundlagen und operatives Produktionsmanagement: Mit 42 Tabellen.* Stuttgart: Lucius & Lucius.  
Grundwissen der Ökonomik Betriebswirtschaftslehre  
ISBN 3825281264
- Zangemeister 2014** Zangemeister, Christof, 2014. *Nutzwertanalyse in der Systemtechnik: Eine Methodik zur multidimensionalen Bewertung und Auswahl von Projektalternativen.* 5. Auflage  
Winnemark: Zangemeister & Partner.  
ISBN 9783923264001
- Zentis 2013** Zentis, Thomas, 2013. *Modell zur Bewertung und Kontrolle technischer Risiken.* Aachen: Apprimus-Verlag.  
Produktionqualität und Messtechnik ,22.  
Aachen, Technische Hochschule, Dissertation, 2013  
ISBN 9783863591618.

**Zimmermann et al. 1991**

Zimmermann, Hans-Jürgen; Gutsche, Lothar, 1991.  
*Multi-Criteria Analyse: Einführung in die Theorie der  
Entscheidungen bei Mehrfachzielsetzungen.*  
Berlin, Heidelberg: Springer.  
ISBN 978-3-540-54483-8  
DOI: 10.1007/978-3-642-58198-4

## 9. Anhang

<b>A Studienarbeiten</b> .....	<b>287</b>
<b>B Thematisch bezogene Veröffentlichungen des Autors</b> .....	<b>288</b>
<b>C Anwendungübergreifende Analyse</b> .....	<b>290</b>
<b>D Fallbeispiele</b> .....	<b>290</b>
D.1 Fallbeispiel 1.....	292
D.2 Fallbeispiel 2.....	295

## **A Studienarbeiten**

Im Rahmen dieser Promotion sind die folgenden studentischen Arbeiten unter wissenschaftlicher Anleitung des Autors entstanden:

- Burak, A.     Ableitung von Handlungsempfehlungen zur Steigerung der Energieeffizienz für Unternehmen ausgewählter Branchen, Universität Stuttgart, 2021
  
- Martin, A.   Entwicklung eines Entscheidungsmodells für die Berücksichtigung von CO<sub>2</sub>-Emissionen bei Investitionsentscheidungen, Universität Stuttgart, 2022
  
- Geisbauer, L. Entwicklung eines lebenszykluskostenbasierten Entscheidungsmodells für Investitionsentscheidungen in der Industrie unter Berücksichtigung von Unsicherheiten, Universität Stuttgart, 2022
  
- Pfeiffer, C.   Analyse von Entscheidungsprozessen für Energieeffizienz in KMUs der deutschen Industrie, Hochschule Weihenstephan Triesdorf, 2020

**B Thematisch bezogene Veröffentlichungen des Autors**

- Büttner, Stefan; Schneider, Christian; König, Werner; MacNulty, Hannes; Piccolroaz, Chiara; Sauer, Alexander. 2022. How Do German Manufacturers React to the Increasing Societal Pressure for Decarbonisation? *Applied Sciences* 12(2), 22 S.
- Büttner, Stefan; Wang, Diana; Schneider, Christian. 2021. Der Weg zur Klimaneutralität: Bausteine einer neuen Methodik zur Bestimmung eines wirtschaftlichen Maßnahmenmix. In: Biedermann, Hubert (Hrsg.): *Digitalisierung im Kontext von Nachhaltigkeit und Klimawandel*. München u.a.: Hampp, 2021, S. 89–106. <http://dx.doi.org/10.5771/9783957102966-89>
- König, Werner; Löbbe, Sabine; Büttner, Stefan; Schneider, Christian. 2020. Establishing energy efficiency in SMEs – energy management to enhance energy efficiency in everyday work life. *European Council for an Energy Efficient Economy u.a.: ECEEE Industrial Efficiency 2020: Decarbonise Industry!* Sep 14–17, 2020. Stockholm, 2020, S. 181–190
- König, Werner; Löbbe, Sabine; Büttner, Stefan; Schneider, Christian. 2020. Establishing Energy Efficiency – Drivers for Energy Efficiency in German Manufacturing Small- and Medium-Sized Enterprises. *Energies* 13, S. 1–31
- König, Werner; Löbbe, Sabine; Büttner, Stefan; Schneider, Christian. 2019. Entscheidungen für Energieeffizienz in KMU: Wie schließen wir die „energy efficiency gap“? *Energiewirtschaftliche Tagesfragen*. Zeitschrift für Energiewirtschaft, Recht, Technik und Umwelt. 69 (7/8), S. 60–62
- Sauer, Alexander; Schneider, Christian. 2021. *Energieeffizienz in der Industrie: Empirische Analysen, Auswertungen und Handlungsempfehlungen*. München: Hanser. ISBN 978-3-446-46650-0
- Schneider, Christian; Burkert, Melina; Sauer, Alexander; Weise, Patrick. 2021. Risikobewertung von Energieeffizienzmaßnahmen: Methode für die Fuzzy-Logik-basierte Risikobewertung von Energieeffizienzmaßnahmen. *wt Werkstattstechnik online* 111(1-2), S. 44–48

Schneider, C., Reisinger, M., Adolf, T., Heßberger, N., Sauer, A. (2021). A Novel 'Automated Hardware Upgrade Service' for Manufacturing Systems. In: Weißgraeber, P., Heieck, F., Ackermann, C. (eds) *Advances in Automotive Production Technology – Theory and Application*. ARENA2036. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg.



## C Anwendungsübergreifende Analyse

### C.1 Verwendete Gewichtungsfaktoren Abbildung 50

Entscheidenden Einfluss auf das Investitionsprogramm für Energieeffizienzmaßnahmen hat die vom Entscheider gewählte Zielgewichtung. Für die Analyse wurden mögliche Zielgewichtungen untersucht, indem das Entscheidungsmodell auf verschiedene Zielgewichtungen angewandt wurde, wobei der erzielbare Kapitalwert sowie die erzielbare jährliche Energieeinsparung als Zielgröße betrachtet wurden. Die verwendeten Zielgewichtungen für die Analyse sind im Einzelnen nachfolgend ersichtlich.

Ökologische Gewichtung	Ökonomische Gewichtung	Umsetzungsbezogene Gewichtung
0	1	0
0.25	0.75	0
0.5	0.5	0
0.75	0.25	0
1	0	0
0	0.75	0.25
0.25	0.5	0.25
0.5	0.25	0.25
0.75	0	0.25
0	0.5	0.5
0.25	0.25	0.5
0.5	0	0.5
0	0.25	0.75
0.25	0	0.75
0	0	1
0.333	0.333	0.333
0.3333	0.6666	0
0.6666	0.3333	0
0	0.6666	0.33333
0.6666	0	0.33333
0	0.33333	0.6666

---

0.33333	0	0.6666
0.75	0.125	0.125
0.125	0.75	0.125
0.625	0.25	0.125
0.25	0.625	0.125
0.4375	0.4375	0.125
0.125	0.125	0.75
0.0625	0.0625	0.875
0.1666	0.16666	0.66666
0	0.125	0.875
0.125	0	0.875
0.875	0	0.125
0	0.875	0.125
0.125	0.875	0
0.875	0.125	0
0.125	0.125	0.75
0.75	0.125	0.125
0.125	0.75	0.125
0.125	0.375	0.5
0.375	0.125	0.5
0.16666	0.5	0.333
0.5	0.16666	0.333

## D Fallbeispiele

### D.1 Fallbeispiel 1

Innerhalb der Risikobewertung erfolgt die Anwendung von linguistischen Variablen, um das Gesamtrisiko der Maßnahmenkategorien zu bestimmen. Die innerhalb der Risikobewertung verwendeten linguistischen Regeln für Fallbeispiel 1 sind nachfolgend ersichtlich.

Regelnummer	Prozessrisiken	Durchführungsrisiken	Planungsrisiken	Gesamtrisiko
1	niedrig	niedrig	niedrig	niedrig
2	niedrig	niedrig	mittel	mittel
3	niedrig	niedrig	hoch	mittel
4	niedrig	niedrig	sehr hoch	hoch
5	niedrig	mittel	niedrig	niedrig
6	niedrig	mittel	mittel	mittel
7	niedrig	mittel	hoch	hoch
8	niedrig	mittel	sehr hoch	hoch
9	niedrig	hoch	niedrig	mittel
10	niedrig	hoch	mittel	mittel
11	niedrig	hoch	hoch	hoch
12	niedrig	hoch	sehr hoch	sehr hoch
13	niedrig	sehr hoch	niedrig	hoch
14	niedrig	sehr hoch	mittel	hoch
15	niedrig	sehr hoch	hoch	hoch
16	niedrig	sehr hoch	sehr hoch	sehr hoch
17	mittel	niedrig	niedrig	mittel
18	mittel	niedrig	mittel	mittel
19	mittel	niedrig	hoch	hoch
20	mittel	niedrig	sehr hoch	hoch
21	mittel	mittel	niedrig	mittel

---

22	mittel	mittel	mittel	mittel
23	mittel	mittel	hoch	mittel
24	mittel	mittel	sehr hoch	hoch
25	mittel	hoch	niedrig	mittel
26	mittel	hoch	mittel	mittel
27	mittel	hoch	hoch	hoch
28	mittel	hoch	sehr hoch	hoch
29	mittel	sehr hoch	niedrig	mittel
30	mittel	sehr hoch	mittel	hoch
31	mittel	sehr hoch	hoch	hoch
32	mittel	sehr hoch	sehr hoch	sehr hoch
33	hoch	niedrig	niedrig	mittel
34	hoch	niedrig	mittel	mittel
35	hoch	niedrig	hoch	hoch
36	hoch	niedrig	sehr hoch	hoch
37	hoch	mittel	niedrig	mittel
38	hoch	mittel	mittel	mittel
39	hoch	mittel	hoch	hoch
40	hoch	mittel	sehr hoch	hoch
41	hoch	hoch	niedrig	mittel
42	hoch	hoch	mittel	hoch
43	hoch	hoch	hoch	hoch
44	hoch	hoch	sehr hoch	hoch
45	hoch	sehr hoch	niedrig	hoch
46	hoch	sehr hoch	mittel	hoch
47	hoch	sehr hoch	hoch	hoch
48	hoch	sehr hoch	sehr hoch	sehr hoch
49	sehr hoch	niedrig	niedrig	hoch
50	sehr hoch	niedrig	mittel	hoch

---

51	sehr hoch	niedrig	hoch	hoch
52	sehr hoch	niedrig	sehr hoch	hoch
53	sehr hoch	mittel	niedrig	hoch
54	sehr hoch	mittel	mittel	hoch
55	sehr hoch	mittel	hoch	hoch
56	sehr hoch	mittel	sehr hoch	sehr hoch
57	sehr hoch	hoch	niedrig	hoch
58	sehr hoch	hoch	mittel	hoch
59	sehr hoch	hoch	hoch	hoch
60	sehr hoch	hoch	sehr hoch	sehr hoch
61	sehr hoch	sehr hoch	niedrig	hoch
62	sehr hoch	sehr hoch	mittel	hoch
63	sehr hoch	sehr hoch	hoch	sehr hoch
64	sehr hoch	sehr hoch	sehr hoch	sehr hoch

## D.2 Fallbeispiel 2

Innerhalb der Risikobewertung erfolgt die Anwendung von linguistischen Variablen, um das Gesamtrisiko der Maßnahmenkategorien zu bestimmen. Die innerhalb der Risikobewertung verwendeten linguistischen Regeln für Fallbeispiel 2 sind nachfolgend ersichtlich.

Regelnummer r	Prozessrisiko n	Durchführungsrisiko n	Planungsrisiko n	Gesamtrisiko
1	niedrig	niedrig	niedrig	niedrig
2	niedrig	niedrig	mittel	mittel
3	niedrig	niedrig	hoch	mittel
4	niedrig	niedrig	sehr hoch	hoch
5	niedrig	mittel	niedrig	niedrig
6	niedrig	mittel	mittel	mittel
7	niedrig	mittel	hoch	mittel
8	niedrig	mittel	sehr hoch	hoch
9	niedrig	hoch	niedrig	mittel
10	niedrig	hoch	mittel	hoch
11	niedrig	hoch	hoch	hoch
12	niedrig	hoch	sehr hoch	sehr hoch
13	niedrig	sehr hoch	niedrig	hoch
14	niedrig	sehr hoch	mittel	hoch
15	niedrig	sehr hoch	hoch	hoch
16	niedrig	sehr hoch	sehr hoch	sehr hoch
17	mittel	niedrig	niedrig	mittel
18	mittel	niedrig	mittel	mittel
19	mittel	niedrig	hoch	hoch
20	mittel	niedrig	sehr hoch	hoch
21	mittel	mittel	niedrig	mittel
22	mittel	mittel	mittel	mittel

---

23	mittel	mittel	hoch	hoch
24	mittel	mittel	sehr hoch	sehr hoch
25	mittel	hoch	niedrig	mittel
26	mittel	hoch	mittel	mittel
27	mittel	hoch	hoch	hoch
28	mittel	hoch	sehr hoch	sehr hoch
29	mittel	sehr hoch	niedrig	hoch
30	mittel	sehr hoch	mittel	hoch
31	mittel	sehr hoch	hoch	hoch
32	mittel	sehr hoch	sehr hoch	sehr hoch
33	hoch	niedrig	niedrig	hoch
34	hoch	niedrig	mittel	hoch
35	hoch	niedrig	hoch	hoch
36	hoch	niedrig	sehr hoch	sehr hoch
37	hoch	mittel	niedrig	hoch
38	hoch	mittel	mittel	hoch
39	hoch	mittel	hoch	hoch
40	hoch	mittel	sehr hoch	hoch
41	hoch	hoch	niedrig	hoch
42	hoch	hoch	mittel	hoch
43	hoch	hoch	hoch	sehr hoch
44	hoch	hoch	sehr hoch	sehr hoch
45	hoch	sehr hoch	niedrig	hoch
46	hoch	sehr hoch	mittel	hoch
47	hoch	sehr hoch	hoch	sehr hoch
48	hoch	sehr hoch	sehr hoch	sehr hoch
49	sehr hoch	niedrig	niedrig	hoch
50	sehr hoch	niedrig	mittel	hoch
51	sehr hoch	niedrig	hoch	sehr hoch

---

52	sehr hoch	niedrig	sehr hoch	sehr hoch
53	sehr hoch	mittel	niedrig	hoch
54	sehr hoch	mittel	mittel	hoch
55	sehr hoch	mittel	hoch	sehr hoch
56	sehr hoch	mittel	sehr hoch	sehr hoch
57	sehr hoch	hoch	niedrig	hoch
58	sehr hoch	hoch	mittel	hoch
59	sehr hoch	hoch	hoch	sehr hoch
60	sehr hoch	hoch	sehr hoch	sehr hoch
61	sehr hoch	sehr hoch	niedrig	sehr hoch
62	sehr hoch	sehr hoch	mittel	sehr hoch
63	sehr hoch	sehr hoch	hoch	sehr hoch
64	sehr hoch	sehr hoch	sehr hoch	sehr hoch





