



## State-of-the-Art dynamischer Methoden zur multikriteriellen Entscheidungsunterstützung

Sebastian Schär

Georg-August-Universität Göttingen

### Abstract

Die Methoden der multikriteriellen Entscheidungsunterstützung (MCDA) bieten die Möglichkeit eine Vielzahl an Kriterien unterschiedlicher Natur im Zuge der Entscheidungsfindung simultan einzubeziehen. Bestimmte Entscheidungen, insbesondere im strategischen Bereich, zeichnen sich zudem durch eine hohe Komplexität aus, da die zugrundeliegenden Annahmen sowie die Auswirkungen der Entscheidung mit Unsicherheiten behaftet sind.

Das Ziel dieser Arbeit war es, durch ein strukturiertes Literaturreview herauszustellen, welche Ansätze zur Erfassung einer solchen dynamischen Entscheidungskomponente es bislang gibt.

Zur Identifikation relevanter Literatur wurden themenrelevante, wissenschaftliche Verlage wie ELSEVIER, sowie die EBS-CO Datenbank genutzt. Auch Dissertationen, Konferenzberichte sowie vorherige Reviewartikel wurden inkludiert. Insgesamt wurden 60 Zeitschriftenartikel aus 31 verschiedenen Zeitschriften, 6 Konferenz-Paper, 11 Buchquellen und eine Dissertation gefunden. Die Literatur wurde anschließend nach dem zugrundeliegenden Verständnis der dynamischen Komponente, sowie deren methodischer Erfassung klassifiziert. Hierbei offenbarten sich drei Gruppen von Ansätzen Dynamik in die MCDA zu integrieren: (1) Szenario-basierte Ansätze, (2) Eine Kombination von MCDA mit Lebenszyklusmodellen (LCA), sowie (3) die direkte Einbeziehung von Dynamik in der Problemformulierung über mehrere Datensätze (DMCDA).

Ein kritischer Vergleich dieser zeigt eine fortgeschrittene Entwicklung mit vielen Anwendungsbeispielen im Forschungsstrang der Szenario-basierten Ansätze. Eine Kombination von MCDA mit LCA kommt vor allem in Nachhaltigkeitsfragen und bei der Beurteilung von Energietechnologien zum Einsatz. Das Gebiet der DMCDA-Ansätze erweist sich als vergleichsweise jüngerer Forschungsstrang mit Ansatzpunkten für zukünftige Forschungsvorhaben.

**Keywords:** Multikriterielle Entscheidungsunterstützung, DMCDA, uncertainty, dynamic decision making, MADM

### 1. Einleitung

Die multikriterielle Entscheidungsunterstützung (engl. Multi-Criteria Decision Analysis, MCDA) erfreut sich in den letzten Dekaden wachsender Beliebtheit. Im Gegensatz zu traditionellen Modellen der Entscheidungsunterstützung, welche häufig nur ein entscheidungsrelevantes Kriterium berücksichtigen, bieten MCDA-Methoden die Möglichkeit eine Vielzahl an Kriterien aus unterschiedlichen Bereichen zu berücksichtigen. Neben quantitativen Kriterien können somit auch gleichzeitig qualitative Aspekte einbezogen werden. Insbesondere im Umgang mit komplexen Entscheidungsproblemen können Methoden der multikriteriellen Entscheidungsunterstützung durch eine strukturierte Problemaufbereitung eine Grundlage für fundierte Entscheidungen liefern (Zimmermann und Gutsche (1991)).

Für bestimmte Entscheidungen ist es zudem hilfreich,

ebenfalls eine zukunftsorientierte Komponente in die Entscheidungsfindung einzubeziehen. Vor allem strategische Planungsentscheidungen unterliegen einer gewissen Dynamik, da die Rahmenbedingungen und Annahmen, unter denen die Entscheidung getroffen wird, sich im Zeitverlauf entscheidend ändern können. Auch die Auswirkungen der getroffenen Entscheidung sind oftmals nicht genau vorhersehbar und somit mit einem gewissen Risiko behaftet (Stewart et al. (2013)). Diese zeitlichen Aspekte gilt es bei dynamischen MCDA-Methoden zu berücksichtigen.

Da die Zahl der Veröffentlichungen zu Methoden der multikriteriellen Entscheidungsunterstützung in den vergangenen Jahren stark angestiegen ist und die Arbeiten zunehmend differenzierter werden, bietet sich das Verfassen eines Reviews an, um die Ergebnisse oder eventuelle Inkonsistenzen und Widersprüche dynamischer MCDA-Methoden aufzu-

zeigen, und so eine Basis für zukünftige Arbeiten und Praxisprojekte zu schaffen (Fettke (2006); Ehrgott et al. (2010)). Gegenstand dieser Arbeit ist es, mithilfe einer strukturierten Literaturrecherche herauszuarbeiten, welche Ansätze es bislang in diesem Forschungsfeld gibt, um zeitliche Aspekte in MCDA-Methoden zu integrieren.

Die Arbeit wird in einen Grundlagenteil, dem Kapitel zwei, und in einen Hauptteil, den Kapiteln drei bis fünf unterteilt. Kapitel sechs schließt die Arbeit ab.

Kapitel zwei soll sich mit den theoretischen Grundlagen der multikriteriellen Entscheidungsunterstützung befassen. Hierzu werden zunächst Bestandteile von Entscheidungsproblemen sowie der Prozess der Entscheidungsfindung mitsamt den gängigen Methoden der multikriteriellen Entscheidungsunterstützung vorgestellt. Auch die mathematische Darstellung soll grundlegend erläutert werden, um eine inhaltliche Auseinandersetzung der recherchierten Methoden im späteren Verlauf der Arbeit zu ermöglichen. Ferner ist das Konzept der Dynamik zu definieren.

Das anschließende Kapitel drei soll das methodische Vorgehen der Arbeit verdeutlichen. Zum Erreichen einer möglichst repräsentativen Stichprobe gilt es, geeignete Suchbegriffe und -kriterien festzulegen, die eine möglichst gezielte Suche nach dynamischen Methoden ermöglichen. Ebenso soll durch eine Charakterisierung dieses Reviews nach dem Schema von Fettke (2006) ein konsistentes und reproduzierbares Vorgehen gewährleistet werden.

In Kapitel vier erfolgt schließlich die Aufbereitung der Rechercheergebnisse. Hier gilt es herauszuarbeiten, wie die dynamische Komponente in den ausgewählten Arbeiten definiert wird und auf welche Weise sie methodische Berücksichtigung findet.

In Kapitel fünf erfolgt eine kritische Diskussion der Rechercheergebnisse. Hierzu werden einerseits Gemeinsamkeiten der ausgesuchten Arbeiten herausgestellt und integriert, als auch Auffälligkeiten analysiert und Lücken in der Forschung aufgezeigt.

Die aus den vorherigen Kapiteln gewonnenen Erkenntnisse werden im abschließenden Kapitel sechs generalisiert, diskutiert und konkreten Handlungsempfehlungen für weitere Arbeiten zu dynamischen Methoden der multikriteriellen Entscheidungsunterstützung vorangestellt.

## 2. Theoretische Grundlagen multikriterieller Entscheidungsunterstützungssysteme

In diesem Kapitel werden die begrifflichen Grundlagen für die weitere Arbeit geschaffen. Hierzu wird in Kapitel 2.1 der Begriff der multikriteriellen Entscheidungsunterstützungssysteme definiert und erläutert, worin Funktion, Nutzen und Ziele dieser bestehen. Anschließend wird die Grundstruktur von Entscheidungsproblemen und der Prozess der Entscheidungsfindung im Ablauf erklärt. Abgeschlossen wird das Kapitel 2.1 durch einen schematischen Überblick gängiger Methoden der multikriteriellen Entscheidungsunterstützung. Das Kapitel 2.2 soll für eine spätere Verwendung

kurz und bündig in die mathematische Notation multikriterieller Entscheidungsprobleme einführen. Schließlich soll eine Definition für das Konzept der Dynamik in Zusammenhang mit multikriteriellen Entscheidungsunterstützungssystemen gefunden werden. Um der Aufgabe eines Reviews gerecht zu werden, wird eine Abwägung über den Umfang der gewählten Definition an dieser Stelle entscheidend sein. Zum einen ist der Begriff eindeutig und klar zu definieren, zum anderen gilt es zu verhindern, dass eventuelle Schlüsselarbeiten aufgrund einer abweichenden Definition des dynamischen Aspektes aus der Betrachtung ausgeschlossen werden.

### 2.1. Entscheidungstheoretische Grundlagen

Bereits alltägliche Situationen, wie die Wahl des Abendessens, stellen ein multikriterielles Entscheidungsproblem dar. Preis, Geschmack, Ort des Einkaufs oder der anfällige Zeitaufwand sind nur einige der vielen Kriterien, welche bei dieser Entscheidung eine Rolle spielen (Yu und Chen (2010)). Ebenso gilt es bei ökonomischen Entscheidungen nicht nur ein einziges kosten- oder gewinnorientiertes Kriterium zu berücksichtigen, sondern vielmehr eine Reihe an relevanten Zielen, welche möglicherweise sogar in Konkurrenz zueinanderstehen und aufgrund unterschiedlicher Maßstäbe nicht problemlos vergleichbar sind (Zimmermann und Gutsche (1991)). Nach Zimmermann und Gutsche sind folgende grundlegenden Charakteristika kennzeichnend für multikriterielle Entscheidungsprobleme:

- Mehrere Ziele: Der Entscheidungsträger entscheidet hierbei selbst über die Relevanz eines Ziels für das Entscheidungsproblem.
- Zielkonflikt: Eine Verbesserung hinsichtlich eines Ziels verschlechtert das Ergebnis hinsichtlich eines anderen Ziels. Es wird ein sinnvolles Kriterium zur Beurteilung der Alternativen benötigt.
- Unvergleichbare Einheiten: Ziele werden mit unvergleichbaren Maßstäben bzw. in nicht vergleichbaren Einheiten gemessen
- Auswahl einer Lösung: Die Handlungsalternative, welche der Entscheidungsträger im Hinblick auf alle Ziele am meisten bevorzugt, wird ausgewählt. Ist die Menge an Handlungsalternativen endlich, so wird die beste Alternative ausgewählt. Bei nicht explizit festgelegter Anzahl an Handlungsalternativen wird die beste Handlungsalternative durch Berechnung ausfindig gemacht.

#### 2.1.1. Multikriterielle Entscheidungsunterstützung

Belton und Stewart (2002) bezeichnen MCDA als Überbegriff für eine Vielzahl von formalen Herangehensweisen eines Entscheidungsträgers oder einer Gruppe von Entscheidungsträgern an Probleme mit mehr als einem relevanten Zielkriterium. Dabei hat MCDA ausdrücklich nicht den Anspruch

eine optimale<sup>1</sup> Lösung zu generieren, welche den oder die Entscheidungsträger von der eigenen Verantwortung befreit. Vielmehr ist die unterstützende Wirkung des Prozesses hervorzuheben, welcher den Entscheidungsträgern dabei hilft, verfügbare Informationen zu organisieren und die subjektive Komponente eines Entscheidungsprozesses gezielt zu formulieren, um ein besseres Verständnis für das Problem zu erlangen (Belton und Stewart (2002); Wilkens (2012)). Vor allem bei schwierigen Gruppenentscheidungen kann dieses Vorgehen das Finden einer gemeinsamen Lösung erleichtern, die Akzeptanz dieser steigern und eventuell sogar neue Handlungsalternativen aufzeigen (Phillips (1990)).

Innerhalb der MCDA wird zwischen den Methoden des MODM (engl. Multi-Objective Decision Making) und des MADM (engl. Multi-Attribute Decision Making) unterschieden. MODM-Methoden bestimmen mithilfe mathematischer Verfahren durch die Aufstellung von Restriktionen eine optimale Lösung aus einem stetigen Lösungsraum. Bei MADM-Methoden hingegen ist die diskrete Anzahl an Alternativen bereits vor Anwendung der Methode bekannt und das Ziel der Methode liegt in einem Vergleich der verschiedenen Alternativen im Hinblick auf definierte Kriterien (Zimmermann und Gutsche (1991)). Weiterhin wird innerhalb der MADM-Methoden zwischen zwei Ansätzen unterschieden: Den Ansätzen der amerikanischen Schule und denen der europäischen. Für letztere findet sich in der Literatur teilweise die Bezeichnung Multi-Criteria Decision Aid, abgekürzt mit MCDA (Omann (2004); Wilkens (2012)). Es sei jedoch ausdrücklich erwähnt, dass im Rahmen dieser Arbeit die Abkürzung MCDA stets den übergeordneten Begriff für sämtliche oben genannten Methoden der multikriteriellen Entscheidungsunterstützung bezeichnet. Vergleichbare Auffassungen dieses Begriffs finden sich etwa bei Belton und Stewart (2002) und Polatidis et al. (2006). An anderer Stelle in der Literatur wird diese Trennung weniger explizit vorgenommen und die Begriffe werden oftmals synonym verwendet (Figueira et al.). Dieses Review beschäftigt sich vorrangig mit den Möglichkeiten zur Implementation der Dynamik innerhalb der Methoden des MADM. Den Methoden des MODM kommt demnach nur eine ergänzende Rolle zu.

### **Bestandteile eines multikriteriellen Entscheidungsproblems**

Um die Bestandteile der MCDA systematisch und konsistent zu erfassen, findet sich in der Literatur die sogenannte CAUSE Checkliste (engl. Criteria, Alternatives, Uncertainty, Stakeholders, Environment). Mithilfe dieser Merkregel lassen sich die folgenden fünf wesentlichen Strukturelemente der MCDA kurz und bündig erklären (Belton und Stewart (2002); Diakoulaki und Grafakos (2004); Ehr Gott et al. (2010)):

Anhand von den Entscheidungsträgern festgelegter Kri-

terien (engl. Criteria) werden die zur Verfügung stehenden Alternativen (engl. Alternatives) verglichen. Eine Alternative bezeichnet in diesem Zusammenhang eine Handlungsoption oder Strategie, welche vor Anwendung der MCDA systematisch erarbeitet und definiert werden sollte (Zimmermann und Gutsche (1991)). Aufgrund der iterativen Natur des MCDA-Prozesses können sich nachträglich jedoch auch noch weitere Alternativen entwickeln und von den Entscheidungsträgern hinzugefügt werden. Die zum Vergleich herangezogenen Kriterien sollten die Ziele und Wertvorstellungen der involvierten Entscheidungsträger widerspiegeln, möglichst eindeutig definiert und mit quantitativen oder qualitativen Skalen messbar sein. Da im Rahmen dieser Arbeit vor allem komplexe Entscheidungsprobleme mit strategischem Charakter betrachtet werden, bezeichnet ein Entscheidungsträger im Zusammenhang dieser Arbeit nur diejenigen Personen, welche den MCDA-Prozess aktiv gestalten und letztendlich auch durch Auswahl einer Alternative Verantwortung für eine Entscheidung tragen. Es kann lediglich ein einzelner, aber auch mehrere Entscheidungsträger im Entscheidungsprozess involviert sein. Der Gruppe der Stakeholder hingegen gehören neben den Entscheidungsträgern selbst zudem jegliche Personen an, die ein Interesse am Entscheidungsproblem besitzen beziehungsweise von den Auswirkungen einer Entscheidung betroffen sind.

Unsicherheit (engl. Uncertainty) ist ein weiterer wesentlicher Bestandteil (dynamischer) multikriterieller Entscheidungsprobleme. Hierbei ist zwischen interner und externer Unsicherheit zu unterscheiden (Wilkens (2012)). Interne Unsicherheit tritt in Zusammenhang mit unpräzise formulierten Daten, wie nicht skalierten linguistischen Äußerungen, auf (Stewart und Durbach (2016)). Diese Form von Unsicherheit kann mithilfe von sogenannten ‚fuzzy sets‘<sup>2</sup> methodisch verarbeitet werden (Zimmermann und Gutsche (1991)). Wesentlicher für diese Arbeit ist jedoch die externe Unsicherheit. Werden im Rahmen der Entscheidungsfindung Annahmen über zukünftige Entwicklungen nicht unter vollkommener Sicherheit getroffen, ist damit stets ein Risiko verbunden. Es ist daher eine wichtige Aufgabe der Entscheidungsträger, diese Unsicherheit möglichst genau zu erfassen und sich dem damit verbundenen Risiko bewusst zu sein (Stewart und Durbach (2016)).

Jede Entscheidungsfindung findet zudem unter bestimmten variablen zeitlichen und örtlichen Umweltfaktoren (engl. Environment) statt, welche das Entscheidungsproblem zusätzlich beeinflussen. Dies können unter anderem staatliche Vorgaben, sozioökonomische oder auch kulturelle Aspekte sein (Diakoulaki und Grafakos (2004)).

### **Ablauf des Entscheidungsfindungsprozesses**

Der Entscheidungsfindungsprozess ist in mehrere Stufen

<sup>1</sup>Es wird ferner ausdrücklich erwähnt, dass im Kontext multikriterieller Entscheidungen das Konzept der Optimalität keine Anwendung findet und somit generell keine eindeutig optimalen Entscheidungen in diesem Rahmen existieren (Belton und Stewart (2002)).

<sup>2</sup>unscharfe Mengen (engl. fuzzy sets) versuchen die fehlende Präzision der verbalen Ausdrucksweise zu erfassen. Unschärf bewertetete Alternativen, wie etwa „sehr teuer“ oder „eher teuer“, werden dabei durch Zugehörigkeitsfunktionen den Mengen der „teuren“ Alternativen mit jeweils einem unterschiedlichen Grad der Zugehörigkeit zugeteilt (Great Britain, Department for Communities and Local Government (2009)).

unterteilt und folgt häufig folgendem generellen Schema (Belton und Stewart (2002); Wilkens (2012)):

1. Beschreibung des Entscheidungskontextes: Bestimmung der Entscheidungsträger, Stakeholder und Ziel des Entscheidungsprozesses
2. Festlegung der zu bewertenden Alternativen
3. Festlegung der Ziele und Kriterien sowie Werte der Alternativen
4. Beschreibung der erwarteten Zufriedenstellung jeder Alternative durch Bewertung
5. Gewichtung der Kriterien entsprechend ihrer relativen Wichtigkeit für die Zielerreichung
6. Aggregation der Gewichtungen und Bewertungen für jede Alternative, um einen Gesamtwert zu erhalten
7. Auswertung der Ergebnisse
8. Sensitivitätsanalysen

Zwar erfolgt ein Entscheidungsfindungsprozess schrittweise nach diesem grundlegenden Schema, jedoch ist er nicht als starr und geradlinig anzusehen (Diakoulaki und Grafakos (2004)). Bis zur endgültigen Entscheidungsfindung können einzelne Schritte oder Schrittfolgen auch wiederholt durchlaufen werden, was dem Vorgehen einen eher iterativen Charakter zukommen lässt (Belton und Stewart (2002)).

## 2.2. Mathematische Formalisierung multikriterieller Entscheidungsprobleme

In diesem Abschnitt wird ein kurzer Überblick über die mathematische Modellierung von MCDA Problemen, basierend auf den Arbeiten von Chen et al. (2010), Campanella und Ribeiro (2011) sowie Jassbi et al. (2014) gegeben. Hierdurch wird die Grundlage für eine spätere Auseinandersetzung mit der Modellerweiterung um eine dynamische Komponente geschaffen.

Die insgesamt  $m$  Alternativen werden mithilfe der Variable  $a_i$ , wobei  $i = 1, \dots, m$ , abgebildet. Die  $n$  verschiedenen Kriterien mithilfe der Variable  $c_j$ , wobei  $j = 1, \dots, n$ . Eine normalisierte Variable  $x_{ij} \in [0, 1]$  repräsentiert das Ausmaß der Zufriedenstellung einer Alternative  $a_i$  bezüglich eines Kriteriums  $c_j$ , oftmals auch als Konsequenz bezeichnet. Ein Wert von 1 korrespondiert hier mit einer maximalen Zufriedenstellung. Folglich ergibt sich folgende  $m \times n$ -Matrix für das multikriterielle Entscheidungsproblem:

$$\begin{matrix} & c_1 & \dots & c_n \\ \begin{matrix} a_1 \\ \vdots \\ a_m \end{matrix} & \begin{bmatrix} x_{11} & \dots & x_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} & = & \begin{bmatrix} X_1 \\ \vdots \\ X_m \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (1)$$

Präferenzen bezüglich Kriterien werden als Gewichtungen (engl. weight) bezeichnet. Die relative Wichtigkeit eines Kriteriums  $c_j$  aus Sicht der Entscheidungsträger wird durch einen Gewichtungsfaktor  $Ww_j$  mit  $j = 1, \dots, n$  dargestellt. Aus allen Gewichtungsfaktoren ergibt sich letztlich der Gewichtungsvektor  $W \in [0, 1]^n$ , mit  $\sum_{j=1}^n w_j = 1$ .

Präferenzen bezüglich einer Konsequenz  $x_{ij}$  werden als Werte (engl. value) bezeichnet und sind abhängig von den individuellen Zielen des Entscheidungsträgers. Um eine Evaluation zu ermöglichen ist es notwendig, alle Konsequenzen  $x_{ij}$  anhand dieser Werte zu konvertieren:

$$v_{ij} = f(x_{ij}) \quad (2)$$

Aus (2) ergibt sich für jede Alternative  $a_i$  der Wertevektor  $v(a_i) = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{in})$ . In einem abschließenden Schritt wird nun mithilfe einer Aggregationsfunktion ein globaler Ergebnisvektor  $\chi \in [0, 1]^n$  erzeugt. Dieser gibt für jede Alternative einen Wert  $X_i$  entsprechend der Vorteilhaftigkeit zwischen 0 und 1 aus:

$$\chi = X(a_i) = F(v(a_i), w) \quad (3)$$

Anhand von (3) lässt sich erkennen, dass die Wahl einer geeigneten Aggregationsfunktion von entscheidender Bedeutung für das Ergebnis ist. Diese Thematik soll an späterer Stelle weiter ausgeführt werden.

## 2.3. Definition des dynamischen Aspektes in multikriteriellen Entscheidungsunterstützungssystemen

Aus der in Kapitel 2.1 bereits angesprochenen Unsicherheit im Zusammenhang mit Entscheidungsproblemen ergibt sich die Notwendigkeit, diesen Bestandteil methodisch zu verarbeiten. Bereits für Keynes zeichnete sich Unsicherheit dadurch aus, dass ihr nicht sinnvoll mit einer Bestimmung von Wahrscheinlichkeiten begegnet werden kann:

“[Under uncertainty] there is no scientific basis on which to form any calculable probability whatever. We simply do not know. Nevertheless, the necessity for action and for decision compels us as practical men to do our best to overlook this awkward fact [...]” (Keynes (1937); nach Montibeller et al. (2006))

Eine ähnliche Definition von Unsicherheit findet sich auch bei Crousillat et al. (1993), hier ausdrücklich im Kontext von Entscheidungsproblemen mit mehreren Alternativen und konkurrierenden Zielen. Jedoch lässt sich mit dem Begriff der Unsicherheit allein der dynamische Aspekt nicht ausreichend präzise definieren. Für eine methodische Berücksichtigung besteht also weiterer Charakterisierungsbedarf. In Gerking (1987) nennt der Autor verschiedene Quellen der Unsicherheit und kombiniert das Konzept der Unsicherheit mit dem der Dynamik in einer sogenannten „dynamischen Unsicherheit“. Diese definiert er als eine im Zeitverlauf sich durch äußere Entwicklungen reduzierende Unsicherheit. Der Unsicherheitsaspekt wird also um eine zeitlich abhängige Komponente erweitert.



Dieses Verständnis der „dynamischen Unsicherheit“ trifft man in der Literatur häufig im Zusammenhang mit Nachhaltigkeit und nachhaltigen Entscheidungen an. Hier kann Unsicherheit zum einen seitens der Entscheidungsträger bezüglich der eigenen Überzeugungen bestehen, aber auch im Hinblick auf die Auswirkungen von Entscheidungen, die häufig nicht mithilfe von Wahrscheinlichkeiten quantifiziert werden können (Lienert et al. (2015); Reichert et al. (2015)). Ein weiterer Unsicherheitsfaktor ist zudem die zukünftige Entwicklung externer Einflussfaktoren (Ribeiro et al. (2013); Scholten et al. (2014)). Montibeller et al. (2006) sehen eine Notwendigkeit für die Entscheidungsträger, sich den wichtigsten Quellen der Unsicherheit bewusst zu werden und ihnen methodisch mittels Ausgestaltung von möglichen Szenarien zu begegnen. Ein ähnliches Verständnis der Dynamik findet sich bei Stewart et al. (2013) und Frini (2014). Sie begreifen die Dynamik als alle verschiedenen Möglichkeiten, wie sich unsichere Zusammenhänge entwickeln können. Die Aufgabe der MCDA ist es, diese bereits in der Gegenwart in den Entscheidungsprozess einfließen zu lassen und so für nachhaltige Entscheidungen zu sorgen.

Weitere Unsicherheiten bestehen bezüglich des technologischen Wandels (Myllyviita et al. (2012)). Die meisten Technologien unterliegen durch komplexe Entwicklungen im Zeitverlauf einem stetigen Wandel. Während neue Technologien in ihrer Leistung und unter Nachhaltigkeitsaspekten den etablierten zwar zunächst unterlegen sein mögen und ihre Einführung zunächst mit Risiken und Unsicherheiten verbunden ist, können sie trotzdem das Potential für eine größere Leistungsfähigkeit besitzen. Dieser Komponente der Dynamik versuchen Oberschmidt et al. (2010) methodisch mithilfe von MCDA und Lebenszyklusmodellen zu begegnen. Eine wichtige Eigenschaft dieser MCDA-Modelle besteht hier in einer Lernfähigkeit der Methode für zukünftige Entscheidungen (Cinelli et al. (2013)). Halog und Manik (2011) definieren den dynamischen Aspekt in diesem Zusammenhang eng angelehnt an die Methode der ‚System Dynamics‘<sup>3</sup>.

Eine erste ausdrückliche Verwendung des Begriffs der dynamischen multikriteriellen Entscheidungsunterstützung (engl. Dynamic Multi-Criteria Decision Making) findet sich in der Arbeit von Kornbluth (1992). Er erweitert die zum damaligen Zeitpunkt vorliegenden Ansätze durch das Einbeziehen einer möglichen Präferenzänderung der Entscheidungsträger im Zeitverlauf und die daraus resultierende Auswirkung auf die gegenwärtige Entscheidungsfindung. So sind laut Kornbluth weder Kriteriengewichtungen noch Wertvorstellungen als statisch anzusehen, sondern unterliegen vielmehr durch das Vorliegen von Unsicherheit einem stetigen Wandel. Die Dynamik liegt also in der permanenten Interaktion von Kriterien und Alternativen (Corner et al. (2001)) im Rahmen eines explorativen Prozesses der Entscheidungsträger,

an dessen Ende erst die finale Entscheidung steht. Zudem beeinflussen vergangene Denkprozesse unterbewusst spätere Entscheidungen (Campanella und Ribeiro (2011)). Chen et al. (2010) begreifen DMCDa (engl. Dynamic Multi-Criteria Decision Analysis) als eine Erweiterung der herkömmlichen MCDA durch die Verwendung mehrerer Datensätze zu Alternativen und Kriterien über einen gewissen Zeitraum und deren methodische Einbeziehung in den Entscheidungsprozess. So sind die involvierten Parameter wie Kriterien, Alternativen, Entscheidungen, Präferenzen oder aber die Problemstruktur nicht länger als fix und stetig anzunehmen, sondern können situationsbedingt oder im Zeitverlauf Änderungen unterliegen (Yu und Chen (2010); Jassbi et al. (2014)).

Angelehnt an diese Definition wird auch die Arbeitsdefinition des dynamischen Aspektes in diesem Review gewählt: Neben einer, von den Entscheidungsträgern ausgehenden, zeitbezogenen Unsicherheit inkludiert der Begriff ebenso exogene Dynamiken im Zusammenhang mit dem technologischen Wandel und im Kontext nachhaltiger Entwicklung. Diese Dynamik spiegelt sich letztendlich methodisch durch sich im Zeitverlauf ändernde Parameter und der Verwendung historischer Daten für zukünftige, zu treffende Entscheidungen wider.

### 3. Methodik der Literatursuche

“An effective review creates a firm foundation for advancing knowledge. It facilitates theory development, closes areas where a plethora of research exists, and uncovers areas where research is needed.” (Webster und Watson (2002))

Um dieser Aufgabe möglichst angemessen nachzukommen, wird in diesem Kapitel eine methodische Vorgehensweise für den folgenden Verlauf der Arbeit entwickelt. Ein etabliertes Schema für die Erstellung eines Reviewbeitrages präsentiert Fettke (2006) in seiner Arbeit nach Vorbild der fünf Phasen der Reviewforschung von Cooper und Hedges (1994, S. 9–13). Dieses Vorgehen soll auch bei der Erstellung dieser Arbeit als methodischer Handlungsrahmen dienen und weitestgehend Reproduzierbarkeit und ein konsistentes Vorgehen gewährleisten:

Nachdem die erste Phase aus Abbildung 1 mit dem Kapitel eins und zwei dieser Arbeit bereits abgeschlossen wurde, steht in diesem Kapitel nun die Recherche relevanter Literatur an. Um den Suchprozess möglichst zielorientiert gestalten zu können, bietet es sich an dieser Stelle an, zunächst die spezifischen Anforderungen an dieses Review herauszuarbeiten. Neben dem Umfang der zu untersuchenden Stichprobe gilt es unter anderem zu klären, an welchen Personenkreis das Review adressiert ist, da dies den Fokus der Untersuchung entscheidend beeinflusst. Des Weiteren soll auch das zu verfolgende Ziel der Arbeit konkretisiert werden. Dies kann etwa in einer Integration der vorliegenden Literatur, aber auch in einer kritischen Diskussion oder einer Herausarbeitung zentraler Aspekte bestehen. Deshalb wird in Kapitel

<sup>3</sup> ‚System Dynamics‘ ist eine von Jay Forrester am MIT entwickelte wissenschaftliche Methode zur Untersuchung und Modellierung der Beziehungen zwischen und innerhalb von Subsystemen. Ziel ist es, die Auswirkung dieser Beziehungen auf das Verhalten des Gesamtsystems herauszufinden (Halog und Manik (2011)).



**Abbildung 1:** Fünf Phasen der Reviewforschung; Quelle: [eigene Darstellung nach Fettke (2006)]

3.1 eine Charakterisierung dieses Reviews nach dem Schema von Fettke (2006) vorgenommen.

Anschließend werden darauf aufbauend in Kapitel 3.2 geeignete Suchbegriffe und Vorgehensweisen bei der Literaturrecherche vorgestellt. Es sollen gezielt Arbeiten gesucht werden, welche den dynamischen Aspekt von MCDA-Methoden berücksichtigen. Fraglich ist, ob Autoren diesen ebenfalls in konsistenter Weise als „dynamisch“ kennzeichnen oder ob unterschiedliche Bezeichnungen in der bisherigen Forschung verwendet werden. Die verwendeten Suchbegriffe sollten das Konzept der Dynamik, im Rahmen der in Kapitel 2.3 festgelegten Definition, also möglichst ganzheitlich erfassen und somit den methodischen Rahmen für die anschließende Literatursuche vervollständigen.

### 3.1. Charakteristik des Reviews

Der Begriff eines Reviews ist in der Literatur verhältnismäßig weit gefasst und wird je nach Autor unterschiedlich definiert (Gardfield (1987), S. 114ff.). Aus diesem Grund präsentiert Fettke in seiner Arbeit folgendes Schema zur Differenzierung verschiedener Typen von Reviews (Fettke (2006) nach: Cooper (1988); Light und Pillemer (1984); Mantel (1973); Virgo (1971)):

Die Einteilung in das Charakterisierungsschema von Fettke, aufgezeigt in Abbildung 2, stellt die Ansprüche an dieses Review heraus und soll ein konsistentes Vorgehen gewährleisten. Ziel ist, nicht zu jedem charakteristischen Kriterium strikt eine Kategorie zu wählen, sondern durch schematisches Vorgehen anschließend eine klar definierte Anforderung an das Review zu erhalten. Ein Review kann demnach einzelne Aspekte isoliert betrachten, es sind jedoch auch kombinierte Betrachtungen denkbar.

Hinsichtlich der Kategorie Typ bietet sich ein natürlichsprachliches Review an. Der Anspruch dieser Arbeit besteht nicht in einer rein quantitativen Betrachtung des derzeitigen State-of-the-Art dynamischer MCDA-Methoden, sondern soll vor allem qualitativ den derzeitigen Forschungsstand beleuchten. Mathematisch-statistische Instrumente nehmen dabei höchstens eine unterstützende Rolle ein.

Resultierend wird der Fokus auf die Theorie im weiteren Sinne, also Bezugsrahmen und Konzepte zur Einbringung der dynamischen Komponente als theorieähnliche Artefakte (Fettke (2006), S. 259), sowie die darauf aufbauenden Methoden, gelegt.

Das Ziel dieses Reviews wurde bereits expliziert, es bedarf jedoch noch einer inhaltlichen Kategorisierung. Im Vordergrund steht hierbei herauszufinden, welche zentralen Ansätze es bisher in der Forschung gibt, um zeitliche Aspekte

in MCDA-Methoden einfließen zu lassen. Neben dieser Herausarbeitung von zentralen Aspekten bietet sich zudem eine kritische Bewertung des derzeitigen Forschungsstandes an, um gezielt Anwendungsmöglichkeiten und Lücken aufzuzeigen. Eine Integration erscheint aufgrund der teilweise stark unterschiedlichen Konzepte zur zeitlichen Berücksichtigung in MCDA-Methoden als nicht besonders sinnvoll und für den Rahmen dieser Arbeit zu umfangreich.

Dieses Review wird aus einer neutralen Perspektive verfasst. Das heißt, es wird bei der Durchsicht der betrachteten Literatur keine theoretische Position bezogen. Auch unterliegt der Zielstellung dieser Arbeit keine Annahme, welche es zu verifizieren oder falsifizieren gilt. Vielmehr wird der thematische Gegenstand dieser Arbeit methodisch von Grund auf neu erarbeitet.

Um diese methodische Erarbeitung möglichst transparent und nachvollziehbar zu gestalten, ist es zudem unabdingbar, die Literatúrauswahl explizit zu erläutern und zu begründen. Dabei sollte die ausgewählte Literatur möglichst repräsentativ für die vorgestellten Ansätze zur Integration der dynamischen Komponente sein. Ziel der Literatúrauswahl ist die Recherche mindestens eines repräsentativen Forschungsstrangs zu jedem der präsentierten Ansätze und so den gegenwärtigen Stand der Forschung in diesem Gebiet herauszustellen.

Die Struktur dieser Arbeit wird demnach unter methodischen Gesichtspunkten gestaltet. Es werden jeweils Arbeiten mit ähnlichen methodischen Ansätzen zur Integration der zeitlichen Komponente vergleichend untersucht und kritisiert.

Die Arbeit ist an eine Zielgruppe, bestehend aus Anwendern von MCDA-Methoden und somit Praktikern als auch Forscher im Gebiet der Operations Research<sup>4</sup>, gerichtet.

Anknüpfungspunkte für zukünftige Forschung sollen durch einen kritischen Vergleich in Kapitel 5 der Arbeit expliziert werden.

### 3.2. Quellenauswahl und Suchmethodik

In diesem Kapitel stehen Phase zwei und drei des Reviewprozesses nach Fettke im Mittelpunkt. Es gilt, zur Klärung der Fragestellung geeignete Literatur zu finden und die dabei verwendete Methodik darzulegen sowie die gefundene Literatur zu verarbeiten.

Zum Erreichen einer möglichst repräsentativen Stichprobe bedarf es geeigneter Suchbegriffe und -kriterien, die eine

<sup>4</sup>Eine genauere Erläuterung des Begriffs der Operations Research findet sich in Kallrath (2013, S. 3ff.).

Charakteristik		Kategorie			
1. Typ		natürlichsprachlich		statistisch	
2. Fokus		Forschungsergebnis	Forschungsmethode	Theorie	Erfahrung
3. Ziel	Nennung	nicht expliziert		expliziert	
	Inhalt	Integration	Kritik	zentrale Themen	
4. Perspektive		neutral		Position	
5. Literatur	Auswahl	nicht expliziert		expliziert	
	Umfang	Schlüsselarbeiten	repräsentativ	selektiv	vollständig
6. Struktur		historisch	thematisch	methodisch	
7. Zielgruppe		Allgemeine Öffentlichkeit	Praktiker	Forscher im Allgemeinen	spezialisierte Forscher
8. Zukünftige Forschung		nicht expliziert		expliziert	

Abbildung 2: Schematische Einteilung des Reviews; Quelle: [eigene Darstellung nach Fettke (2006)]

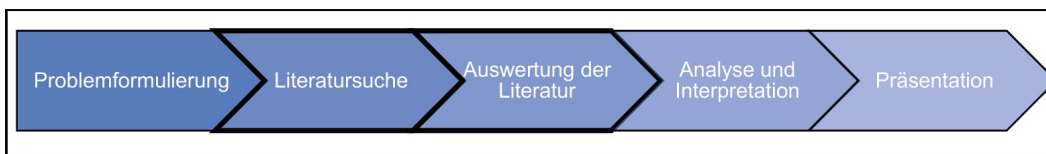


Abbildung 3: Aktuelle Phase des Reviewprozesses; Quelle: [eigene Darstellung nach Fettke (2006)]

möglichst gezielte Suche nach dynamischen Methoden ermöglichen. Hierzu merken Cooper und Hedges (1994) an, dass sich selbst bei der Nutzung der bekanntesten großen Datenbanken noch Erkenntnislücken durch unveröffentlichte Arbeiten ergeben können. Diese ließen sich nur durch Kontaktierung der auf das Themengebiet spezialisierten Forscher inkludieren, was einer objektiven und erstrebenswerten Suchmethodik jedoch nicht gerecht werden würde. Anstelle dem Anspruch der Vollständigkeit nachzukommen, sollte der Fokus für den Reviewsynthetiker somit eher auf der Wahl möglichst komplementärer und sorgfältig ausgewählter Erkenntnisquellen liegen. Auch für dieses Review dient dies als Leitlinie der Literatursuche.

Als Erkenntnisquellen kommen somit die Suchmasken der themenrelevanten wissenschaftlichen Verlage wie ELSEVIER, sowie die Datenbank der Ebsco Business Source Premier (EBSCO) in Frage. Lehrbüchern fällt aufgrund der fehlenden Aktualität nur eine ergänzende Rolle zu. Aufgrund der hohen Themenspezifität und der Tatsache, dass es sich bei dem Gebiet der dynamischen MCDA-Methoden um ein relativ junges Forschungsfeld handelt, soll das Ranking nach dem Verband der Hochschullehrer für Betriebswirtschaft e.V. (vhbonline.org) der in Betracht kommenden Journals zwar betrachtet werden, aber zunächst nur ein zweiträn-

giges Klassifizierungskriterium sein. Auch Dissertationen, veröffentlichte Konferenzberichte sowie vorherige Reviewartikel werden aufgrund der Themenaktualität inkludiert. Abschlussarbeiten sind jedoch von der Suche ausgeschlossen.

Der Anspruch an den Umfang der Literatursuche wurde in Kapitel 3.1 dargelegt. Hierzu bedarf es zunächst einer grundlegenden Recherche zur Identifikation aktueller Arbeiten zu dynamischen MCDA-Methoden. Als Startzeitpunkt der Suche wurde das Jahr 1987 verwendet, da zu diesem Zeitpunkt das Konzept der Dynamik in Gerking (1987) erstmals in Verbindung mit multikriteriellen Entscheidungen in der Literatur thematisiert wurde. Zur Suche wurden folgende Begriffe in den oben genannten Datenbanken verwendet: multi-criteria analysis, multi-criteria decision making, multi-criteria decision analysis, mcda, mcdm, multiple criteria analysis, uncertainty decision, dynamic decision making, dynamic mcda, dynamic multi-criteria, dynamic multiple criteria decision analysis, dynamic mcdm, dynamic mcda. Die gefundenen Arbeiten wurden ferner nach für die Fragestellung geeigneten Referenzen (Rückwärtssuche), als auch nach Zitationen in späteren Arbeiten (Vorwärtssuche) durchsucht. Hierdurch wird trotz fehlender Vollständigkeit eine weitgehende Erfassung bestehender Forschungsstränge ge-

währleistet. Basierend auf diesem Suchprozess wurden nach einer Studie des Titels und Abstracts (sofern vorhanden) 60 Zeitschriftenartikel aus 31 verschiedenen Zeitschriften, 6 Konferenz-Paper, 11 Buchquellen und eine Dissertation gefunden. Die Suche wird als beendet betrachtet, wenn sich trotz fortschreitender Suche keine neuen methodischen Konzepte in den Suchergebnissen erkennen lassen (Webster und Watson (2002)). Mit Abschluss der Suche ist ebenso die zweite methodische Phase beendet.

Gegenstand der nun folgenden dritten methodischen Phase ist eine Verarbeitung der identifizierten Literatur. Diese ist auf Relevanz zu überprüfen, zu verarbeiten und geeignet zu systematisieren (Fettke (2006)).

Die in Phase zwei identifizierten Arbeiten wurden auf Basis einer Lektüre des definitorischen und methodologischen Teils klassifiziert. Als Kategorien zur Klassifizierung wurden, wie in Tabelle 1 dargestellt, das Veröffentlichungsjahr, die Art der Quelle, der Name des Journals, sofern es sich um Artikel aus wissenschaftlichen Zeitungen handelt, das Ranking des Journals (falls vorhanden) und die verwendete Methode gewählt. Ferner wurde untersucht, ob und in welcher Art und Weise eine dynamische Komponente im Sinne der in Kapitel 2.3 gegebenen Definition methodische Berücksichtigung findet. Die vollständige Tabelle kann dem Anhang entnommen werden. Alle Arbeiten ohne Bezug zu dynamischen MCDA-Methoden wurden dabei für eine weitere Berücksichtigung ausgeschlossen.

Anschließend wurde eine Auswahl in dieser Arbeit zu inkludierender Forschungsstränge vorgenommen. Ein Forschungsstrang zeichnet sich, neben einem einheitlichen Verständnis des Dynamikbegriffes, durch aufeinander aufbauende, ähnliche konzeptionelle Ansätze zur Berücksichtigung einer dynamischen Komponente in MCDA-Methoden aus. Zu jedem dieser Forschungsstränge wurden möglichst repräsentative Arbeiten gesucht, anhand welcher eine methodische Entwicklung bis hin zum aktuellen Forschungsstand ersichtlich wird. Beiträge aus höher bewerteten Zeitschriften wurden hierbei denen aus schlechter bewerteten bevorzugt.

#### 4. Einbeziehung der dynamischen Komponente

In diesem Kapitel wird mit der Aufbereitung der Rechercheergebnisse die Analyse aus der vierten methodischen Phase des Reviewprozesses nach Fettke (2006) behandelt, bevor im anschließenden Kapitel fünf die Interpretation erfolgt.

Insgesamt wurden 51 der insgesamt 78 gefundenen Arbeiten als relevant im Sinne der in dieser Arbeit verwendeten Definition von Dynamik erachtet, was einer Quote von 65,4% entspricht. Die gefundenen Arbeiten entstammen den Jahren 1987 bis 2017.

Anhand der in Kapitel 2.3 festgelegten Arbeitsdefinition von Dynamik wurden folgende drei Gruppen für die zu inkludierenden Forschungsstränge gebildet: Szenario-basierte Ansätze, solche, die Lebenszyklus-Modelle verwenden und diejenigen, welche eine dynamische Problemstrukturierung behandeln. Anschließend wurde jede der 51 als relevant er-

achteten Arbeiten genau einer Gruppe zugeordnet, um Redundanzen zu vermeiden. Die ausgefüllte Tabelle der klassifizierten Literatur kann dem Anhang entnommen werden.

Die folgenden drei Unterkapitel betrachten diese drei unterschiedlichen Ansätze, eine dynamische Komponente in multikriterielle Entscheidungsprobleme zu integrieren, nun ausführlich und getrennt voneinander. Die Arbeiten wurden zur Analyse anhand der publizierenden Zeitschrift bzw. Buchtitels, dem entsprechenden Ranking der Zeitschrift sowie der verwendeten MCDA-Methode klassifiziert. Zusätzlich wurden die Arbeiten nach weiteren Methodiken durchsucht, die in Kombination mit MCDA eine Integration der Dynamik ermöglichen. Die Analyse der betrachteten Ansätze erfolgt geordnet nach Forschungssträngen und innerhalb eines Forschungsstrangs jeweils chronologisch. Diese Vorgehensweise wird gezielt gewählt, um die methodischen Entwicklungen bis zu einem möglichst aktuellen Forschungsstand aufzuzeigen und eventuellen weiteren Forschungsbedarf im weiteren Verlauf der Arbeit aufzudecken.

Die als nicht relevant klassifizierten Arbeiten wurden von einer weiteren Betrachtung ausgeschlossen, da sie sich entweder thematisch nicht der MCDA widmen (Crousillat et al. (1993); Millán et al. (1998); Miranda und Proenca (1998); Labuschagne und Brent (2005); Münzberg et al. (2014)), keinen dynamischen Aspekt im Sinne der hier verwendeten Arbeitsdefinition behandeln (Fishburn und Lavalley (1999); Matsatsinis und Samaras (2001); Braune et al. (2009); Kilgour et al. (2010); Mardani et al. (2015b); Rezaei (2015)) oder methodische Lösungen basierend auf Fuzzy MCDA vorschlagen (Mardani et al. (2015a)). Ebenso ausgeschlossen wurden Arbeiten, die sich mit MODM-Methoden beschäftigen (Aouni et al. (2015)). Weitere Arbeiten weisen zwar eine thematische Relevanz auf, wurden jedoch im Rahmen des Auswahlprozesses keinem repräsentativen Forschungsstrang zugeordnet und deshalb nicht weiter analysiert (Stewart (1992); Gorenstin et al. (1993); Linares (2002); Omann (2004); Hites et al. (2006); Mendoza und Martins (2006); Lin et al. (2008); Belton und Stewart (2010); Benítez et al. (2012); Xu und Ouenniche (2012); Jiang et al. (2014); Kluczek (2016); Zolfani et al. (2016a)).

##### 4.1. Szenario-basierte Ansätze

Bei Gerking (1987) findet sich eine der ersten Arbeiten zur Integration von Dynamik in die MCDA von Entscheidungsproblemen mithilfe von Szenarien. Gerking greift das Problem der Unsicherheit bei multikriteriellen Entscheidungsproblemen auf und erweitert dies um eine zeitabhängige, dynamische Komponente. Diese im Zeitverlauf abnehmenden „dynamischen Unsicherheiten“ (engl. dynamic uncertainties, Gerking (1987), S. 193) treten im Zusammenhang mit mehrstufigen Entscheidungsprozessen auf. Diese liegen vor allem bei strategischen Entscheidungen vor, etwa im Bereich des Energiemanagements. Die Besonderheit ist hier unvollkommene Vorhersehbarkeit. Das bedeutet, dass während des mehrstufigen Entscheidungsprozesses unerwartete Änderungen noch zu treffende Entscheidungen beeinflussen können. Gerking's Ansatz berücksichtigt



**Tabelle 1:** Klassifikation der gefundenen Literatur

Autoren und Veröffentlichungsjahr	Titel	Art der Quelle	Name des Journals	Ranking	Verständnis der dynamischen Komponente	verwendete Methodik
-----------------------------------	-------	----------------	-------------------	---------	--	---------------------

**Abbildung 4:** Analytische Phase des Reviewprozesse

sowohl dynamische Unsicherheiten als auch unvollkommene Vorhersehbarkeit folgendermaßen: Zunächst wird das Entscheidungsproblem abgebildet und eine Lösung für die entscheidungsrelevante Periode erzeugt. Anschließend können in einem Nachbearbeitungsprozess ausgewählte Variablenwerte für zukünftige Perioden verändert werden. Bei einer Fixierung der Variablenwerte für vergangene Perioden können somit schrittweise und für jede Entscheidungsrelevante Variable verschiedene Szenarien abgebildet und ein stufenweiser, dynamischer Entscheidungsprozess ermöglicht werden. Ein aktueller Reviewartikel zum Umgang mit Unsicherheiten wurde von [Stewart und Durbach \(2016\)](#) verfasst, mit einem separaten Kapitel zu MADM-basierten Szenarioplanungsansätzen ([Stewart und Durbach \(2016\)](#), S. 486ff.).

#### 4.1.1. Das MAVT-Rahmenkonzept von Goodwin und Wright

Goodwin und Wright widmen sich in Ihren Arbeiten ebenfalls dem potenziellen Nutzen der Szenarioplanung für strategische Entscheidungen. Dabei gelangen sie zu einer identischen Definition von Szenarien wie Gerking ([Gerking \(1987\)](#)). Ein Szenario ist keine Vorhersage der Zukunft, sondern mehrere Szenarien ermöglichen die Beschreibung plausibler zukünftiger Entwicklungen ([Wright und Goodwin \(1999\)](#)). Zwar hat ein einzelnes Szenario eine bestimmte Eintrittswahrscheinlichkeit, das Ziel ist es jedoch durch eine Spanne an Szenarien den Handlungsrahmen für zu treffende Entscheidungen festzulegen. In [Wright und Goodwin \(1999\)](#) legen die Autoren zunächst unter psychologischen Gesichtspunkten den Nutzen von Szenarioplanung für strategische Entscheidungsträger dar, bevor sie in einer späteren Arbeit die Eignung der Multi-Attribute Value Theory (MAVT), einem klassischen MADM-Verfahren, für die Strukturierung strategischer Entscheidungsprozesse mit Szenariobetrachtung untersuchen ([Goodwin und Wright \(2001\)](#)). Sie kommen dabei zu dem Ergebnis, dass eine MAVT-Modellierung für strategische Entscheidungen mit mehreren Szenarien den Anforderungen entspricht und deutlich besser geeignet ist als eine MAUT-Modellierung (engl. Multi-Attribute Utility Theory), welche sich laut Goodwin und Wright vor allem durch die benötigte Zuweisung von Wahrscheinlichkeiten und die fehlende Transparenz als nicht geeignet erweist. Methodisch sieht das vorgeschlagene MAVT-Rahmenkonzept von Goodwin und Wright folgendermaßen aus:

- Festlegung der strategischen Optionen und Szenarien
- Eine Handlungsalternative entspricht hierbei einer strategischen Option unter einem jeweiligen Szenario
- Festlegung eines Wertebaums, welcher den strategischen Zielen entspricht
- Bewertung der Handlungsalternativen auf Basis des erstellten Wertebaums anhand einer Skala von 0 bis 100
- Gewichtung der Ziele des Wertebaumes mit der ‚swing weight‘-Methode
- Gesamtaggregation der Werte für jede Handlungsalternative anhand der im vorherigen Schritt festgelegten Gewichtung

[Montibeller et al. \(2006\)](#) greifen den Konzeptrahmen von [Goodwin und Wright \(2001\)](#) für strategische Entscheidungen auf und diskutieren anhand zweier Fallstudien erstmals die aus diesem Ansatz resultierenden praktische Probleme. Als Erweiterung schlagen Sie die Verwendung von jeweils einem separaten MCDA-Modell für jedes erstellte Szenario vor, um die Gewichtung des Wertebaumes für jedes Szenario unabhängig gestalten zu können und so die Evaluation der strategischen Optionen zu erleichtern. Des Weiteren weisen [Montibeller et al.](#) den Handlungsoptionen eine Robustheit zu und identifizieren über alle Szenarien hinweg eine „sichere“ beziehungsweise robuste Option. Dies geschieht durch die Betrachtung des Wertes der Zufriedenstellung jeder Handlungsoption und die Differenz zum Wert der maximalen Zufriedenstellung von 100. Das geringste Maximum all dieser Differenzen über alle Szenarien repräsentiert dabei die insgesamt robusteste Entscheidung. In einer späteren Arbeit führen [Ram und Montibeller \(2013\)](#) diesen Entscheidungsfindungsprozess unter dem Gesichtspunkt der Robustheit fort und wenden es zudem in der Praxis an. Zukünftigen Forschungsbedarf sehen die Autoren in einem ausführlichen Vergleich zwischen MCDA in Kombination mit Szenarioplanung und herkömmlichen MCDA-Methoden basierend auf Entscheidungsbäumen sowie in einer Optimierung der Methode für komplexe strategische Entscheidungen mit vielen Handlungsoptionen.

Durbach und Stewart betrachten in Ihrem Review unter anderem auch die Konstruktion von Szenarios für den Um-

gang mit Unsicherheit bei komplexen strategischen Entscheidungen (Durbach und Stewart (2012), S. 8 ff.) und kommen zu dem Ergebnis, dass Szenario-basierte MCDA-Ansätze eine vielversprechende Möglichkeit für den Umgang mit Unsicherheit darstellen, wenngleich dieses Forschungsfeld jedoch noch weiterer Anwendungsarbeiten bedarf. Zur Arbeit von Montibeller et al. (2006) führen sie an, dass eine Argumentation mithilfe der Robustheit jedoch auch irreführend sein kann.

In Stewart et al. (2013) wird diese Kritik am Ansatz von Montibeller et al. (2006) anhand eines numerischen Beispiels konkretisiert. Ferner kommen Stewart et al. zu dem Schluss, dass MAVT-Methoden aber auch andere Methoden der quantitativen Entscheidungsanalyse, welche keine Nutzenfunktionen und Wahrscheinlichkeitsfunktionen von korrelierenden Variablen verlangen, gleichermaßen geeignet erscheinen. Als Richtlinie für strategische Entscheidungen schlagen sie die Generierung von 4-6 Szenarien vor (Stewart et al. (2013), S. 683). Des Weiteren werden Metakriterien, eine Kombination aus Szenarien und primären Kriterien, eingeführt. Diese ermöglichen es, jedes Kriterium in mehreren Szenarien gleichzeitig zu betrachten.

In Goodwin und Wright (2014) findet sich eine Anwendung von Entscheidungsunterstützung für strategische Verhandlungen der Managementebene. Auf Basis der MAVT können hierdurch die Werte und Ziele von Verhandlungspartnern antizipiert werden, ohne diese direkt von ihnen zu erheben und auf diese Weise eine vorteilhafte Verhandlungsposition zu schaffen. Eine methodische Weiterentwicklung dieses Ansatzes schlagen Cairns et al. (2016) in einer anschließenden Arbeit mit Fokus auf den Wechselwirkungen von mehreren Stakeholdern mit unterschiedlichen Zielen und Werten vor. Schrittweise wird durch die Verwendung der CSR-Methode (engl. critical scenario method) jeder Alternativen-Stakeholder-Kombination für jedes Szenario ein Zufriedenstellungswert zugeordnet und anschließend auf Basis der Verhandlungsmacht der jeweiligen Gruppe von Stakeholdern gewichtet.

#### 4.1.2. Anwendungen und Erweiterungen des Rahmenkonzeptes von Goodwin und Wright

Basierend auf den vorherigen Arbeiten (Goodwin und Wright (2001); Montibeller et al. (2006); Stewart et al. (2013)) schlagen Scholten et al. (2014) einen neuen Ansatz für robuste und nachhaltige Sanierungsstrategien im Wassermanagement vor. Hierzu kombinieren sie Methoden des Vermögensmanagements, der Schadensmodellierung, der Entscheidungsunterstützung sowie der Szenarioanalyse. Die Verwendung von MCDA bzw. einem MAVT/MAUT-Modell ermöglicht laut Scholten et al. das Finden einer robusten und nachvollziehbaren strategischen Entscheidung.

In Lienert et al. (2015) präsentieren die Autoren ausführlich einen praktischen Problemstrukturierungsprozess mithilfe von Szenarioplanung und MAUT-Analyse mit besonderem Fokus auf der Bestimmung des Problemkontexts, der Stakeholderauswahl, Szenariodefinition und Zielhierarchie samt

Attributbestimmung. Die anschließenden Schritte der Bestimmung der Konsequenzen für jedes Szenario, der Bestimmung der Präferenzen und Gewichtungen, Durchführung einer Sensitivitätsanalyse zum Identifizieren der robusten Alternativen sowie das Einholen von Stakeholder-Feedback werden in Zheng et al. (2016) behandelt. Zusätzliche Informationen zur durchgeführten MAUT-Analyse, insbesondere zu einer globalen Sensitivitätsanalyse anstelle einer lokalen findet sich in Scholten et al. (2015). Aufgrund der einfacheren Bestimmung von Wertefunktionen im vorliegenden Problemkontext wird zunächst diese gebildet und anschließend in eine Nutzenfunktion transformiert. Eine ausführliche Beschreibung des Umwandlungsprozesses liefert die Arbeit von Reichert et al. (2015).

Einer erweiterten Aggregationsfunktion widmet sich Zahir (2016) in seiner Arbeit, um unerwünschte Vertauschungen, verursacht durch das Entfernen oder Hinzufügen von Alternativen nach bereits abgeschlossener Normalisierung, zu vermeiden. Hierzu schlägt er eine modifizierte gewichtete Summenregel für die Anwendung in AHP (engl. analytic hierarchical process) und MAVT-Methoden vor und liefert ein numerisches Anwendungsbeispiel.

#### 4.1.3. Weitere Ansätze zur Integration einer dynamischen Komponente in MCDA-Methoden

Die im vorherigen besprochenen Arbeiten greifen sehr stark auf die klassischen MADM-Verfahren der amerikanischen Schule zurück. Hingegen verwenden Vaillancourt und Waaub (2004) anstelle der MAVT bzw. MAUT mit PROMETHEE einen Outranking-Ansatz der europäischen Schule zur Untersuchung einer gerechten Beschränkung von Treibhausgasemissionen auf internationalem Level. Das vorgeschlagene MCDA-Modell berücksichtigt eine dynamische Komponente im Sinne einer veränderbaren Kriteriengewichtung und in der anschließenden Evaluation durch die Einführung veränderbarer Prioritäten, um die weltweit nicht einheitliche Auffassung bezüglich einer gerechten Zuweisung von Emissionsbeschränkungen abbilden zu können. Weitere Methoden und Anwendungen von PROMETHEE werden ausführlich im Reviewbeitrag von Behzadian et al. (2010) aufgeführt und besprochen.

Eine aktuellere Arbeit von Schmuck et al. (2012) zeigt die Verwendung von PROMETHEE zur Wahl eines Energieerzeugungssystems in der Gemeinde Ludwigsfelde. Hierzu wurden sieben Energieversorgungs-szenarien erstellt und die Kriteriengewichtung wurde mithilfe einer „stillen Abstimmung“<sup>5</sup>. Wilkens und Schmuck sehen den Vorteil von Outranking-Ansätzen in der geringeren Kompensation während der Aggregation im Vergleich zu nutzen- und wertebasierten Methoden, was für den Einsatz im Nachhaltigkeitsmanagement wünschenswert sei.

<sup>5</sup>engl. silent negotiation. Hierbei teilt jeder Entscheidungsträger seine Gewichtung in Form einer Abstimmungskarte mit. Auf diese Weise soll eine, bedingt durch die große Anzahl an Entscheidungsträgern, zu ausführliche Diskussion vermieden und eine demokratische Stimmgleichheit gewährleistet werden (Schmuck et al. (2012), S. 615 nach; Pictet und Bollinger (2005))

Ein weiteres Anwendungsbeispiel für die Wahl eines Energieversorgungssystems am Beispiel Portugals von Ribeiro et al. (2013) generiert zunächst fünf verschiedene Szenarien für zukünftige Energieversorgungssysteme mithilfe eines gemischt-ganzzahligen linearen Optimierungsmodells<sup>6</sup> in GAMS und evaluiert diese anschließend separat in einem MCDA-Tool mit additiver Wertefunktion.

Frini (2014) knüpft thematisch an die Arbeit von Ribeiro et al. an und präsentiert ein multikriterielles Entscheidungsunterstützungsmodell mit mehreren Szenarien und einer Evaluation über mehrere Perioden zur Auswahl eines nachhaltigen Energieversorgungssystems. Durch die Evaluation von mehr als nur einer zukünftigen Periode soll das Finden einer nachhaltigen Lösung verbessert werden. Hierzu schlägt Frini ein vierstufiges Modell vor. Innerhalb der Phasen kommen dabei unter anderem verschiedene MADM-Methoden zum Einsatz: In der Phase der Problemstrukturierung und Unsicherheitsbewertung die Methoden AHP und MACBETH. In den anschließenden Aggregationsphasen wird über die vorher festgelegten Kriterien, Perioden und Szenarien jeweils die Anwendung von TOPSIS aufgrund der geringen Anforderungen an die Präferenzmodellierung vorgeschlagen, um zur finalen Auswertung zu gelangen.

Auffallend bei Arbeiten der letzten 15 Jahre zum Anwendungsgebiet der nachhaltigen Entwicklung ist neben der methodischen Integration von Szenarioplanung und multikriterieller Entscheidungsunterstützung der häufige Einsatz von Lebenszyklusmodellen. So unter anderem in der hier besprochenen Arbeit von Wilkens und Schmuck. Deshalb wird das folgende Unterkapitel diese methodische Komponente genauer betrachten.

#### 4.2. Verwendung von Lebenszyklus-Modellen

Neben der im vorherigen Abschnitt adressierten Unsicherheit bezüglich der Entwicklungen externer Einflussfaktoren weisen Energieversorgungssysteme sowie Technologien im Allgemeinen ebenso eine zeitabhängige Dynamik auf und unterliegen keinesfalls einer stetigen und absehbaren Entwicklung. Während neue Technologien in ihrer Umweltfreundlichkeit den etablierten zwar zunächst unterlegen scheinen und ihre Einführung zunächst mit Risiken und Unsicherheiten verbunden ist, können sie doch das Potential für eine zukünftig größere Leistungsfähigkeit mit sich bringen. Als Instrument zur Beurteilung von Produkten und Prozessen wurde deshalb das sogenannte LCA (engl. Life-cycle assessment) entwickelt (Geldermann und Rentz (2005); nach Guinée (2002)). Für Entscheidungen im Kontext nachhaltiger Entwicklungen erscheint aufgrund der hohen Konfliktrichtigkeit des Themas zusätzlich ein Einsatz der MCDA als geeignet, wie Munda in seiner Arbeit ausführt (Munda (2016)). Dieses Kapitel soll Ansätze untersuchen, welche diese beiden Instrumente miteinander kombinieren.

<sup>6</sup>engl. Mixed Integer Linear Programming, kurz MILP; für weitere Erläuterungen siehe (Kallrath (2013))

Ein erstes Rahmenkonzept, bestehend aus integriertem Lebenszyklus- und Entscheidungsmodell mit Berücksichtigung einer dynamischen Komponente in Form eines langfristigen Zeithorizontes bei der Energiesystemplanung, liefern Polatidis et al. (2003). In einer späteren Arbeit werden Outranking, Wert- beziehungsweise Nutzenfunktions-basierte sowie einige weitere MCDA-Methoden auf einen Einsatz innerhalb des vorgestellten Rahmenkonzeptes vergleichend überprüft (Polatidis et al. (2006)).

Eine weitere vergleichende Betrachtung der Anwendung von MAUT, AHP, ELECTRE und PROMETHEE in der Nachhaltigkeitsbewertung auf Basis zehn verschiedener Vergleichskriterien führen Cinelli et al. (2013) in einer späteren Arbeit durch. Die Ergebnisse können der Tabelle 4.2 entnommen werden:

##### 4.2.1. Klassische Ansätze zur Integration von MCDA in die Lebenszyklus-Analyse

Eine mögliche Anwendung von AHP zeigen Hermann et al. (2007) mit der Entwicklung der Methode COMPLIMENT auf. COMPLIMENT (engl. COMbining environmental Performance indicators, Life cycle approach and Multi-criteria to assess the overall ENvironmental impacT) kombiniert die Stärken und Einsatzwecke der Instrumente der LCA, MCDA sowie von Leistungskennzahlen eines Unternehmens bezüglich Umweltfreundlichkeit<sup>7</sup> in einer gemeinsamen Methode, um eine genauere Bewertung von Umweltbelastungen bestimmter Geschäftsbereiche oder Prozesse anhand eines Indexes zu erhalten. Der Nutzen von AHP liegt hierbei in der Anwendung im abschließenden Aggregationsprozess auf die durch EPI erhaltenen und von LCA klassifizierten Daten bezüglich der Umweltbelastung. Ebenso wie Hermann et al. schlagen Halog und Manik (2011) eine Verwendung von AHP in einem integrierten Rahmenkonzept für die Nachhaltigkeitsbewertung betrieblicher Aktivitäten vor. Die Aufgabe der MCDA liegt hierbei in der Berücksichtigung von Ansprüchen der verschiedenen Stakeholder. Anschließend wird durch Data Envelopment Analysis (DEA), Agent Based Modelling (ABM), System Dynamics (SD), Sustainable Network Theory (SNT) sowie Szenarioplanung die durch Interdependenzen und Unsicherheiten entstehende Dynamik methodisch verarbeitet. Die Autoren präsentieren hiermit eine der wenigen Arbeiten, welche eine Applikation von LCA und Input-Output-Analyse methodisch verbindet. Eine Forschungslücke, die auch Onat et al. (2016) in einem kurzen Reviewkapitel Ihrer Arbeit aufzeigen. Desweiteren sehen Onat et al. weiteren Forschungsbedarf bei der Integration von MODM und LCA, was jedoch aufgrund der in dieser Arbeit getroffenen Fokussierung auf MADM-Methoden nicht weiter ausgeführt werden soll. Einen jüngeren Ansatz zur Integration von MADM-Methoden der amerikanischen Schule in LCA steuern Scott et al. (2016) bei. Sie wenden die MAUT auf die Ergebnisse der LCA über mehrere Szenarien hinweg an, um

<sup>7</sup>für nähere Informationen zu Environmental Performance Indicators, kurz EPI, siehe (Jasch (2000))

**Tabelle 2:** Ergebnisse der Untersuchung von Cinelli et al.; Quelle: [eigene Darstellung nach Cinelli et al. (2013)]

Evaluationskriterium	MAUT	AHP	ELECTRE	PROMETHEE
Lebenszyklus-Perspektive	möglich	möglich	möglich	möglich
Anfälligkeit für Kompensation	hoch	hoch	nicht möglich/ teilweise	teilweise/ hoch
Wahl der Gewichtungsfaktoren	eingeschränkt	eingeschränkt/ alle wichtigen Koeffizienten	alle wichtigen Koeffizienten	eingeschränkt/ alle wichtigen Koeffizienten
Einbeziehung verschiedener Schwellenwerte	nicht möglich/ möglich	nicht möglich	möglich	möglich
qualitative und quantitative Daten	möglich	möglich	möglich	möglich
Sensitivitätsanalyse/ Unsicherheitsbewertung	möglich	teilweise möglich/ möglich	möglich	teilweise möglich/ möglich
Robustheit	Rangumkehrung nicht möglich	Rangumkehrung möglich	Rangumkehrung möglich	Rangumkehrung möglich
Benutzerfreundlichkeit	hoch/ gering	hoch/ mittel	gering	mittel
Lernfähigkeit des Modells	schwierig implementierbar	schwierig implementierbar	schwierig implementierbar	einfach implementierbar mittels Szenarioanalyse
Graphische Veranschaulichung	großes Angebot vorhanden	großes Angebot vorhanden	großes Angebot wenig Möglichkeiten zur graphischen Veranschaulichung	großes Angebot an Software vorhanden



Unsicherheiten, bedingt durch Umwelteinflüsse, Modellannahmen sowie durch von Entscheidungsträgern festgelegte Präferenzen, besser abschätzen zu können. Laut Scott et al. liegt der Vorteil von MAUT hierbei vor allem in der hohen Transparenz und der Möglichkeit, die Präferenzen der Entscheidungsträger über eine Nutzenfunktion einfließen zu lassen.

#### 4.2.2. Anwendungsbeispiele und Entwicklung von Outranking-Methoden

Geldermann und Rentz (2005) präsentieren eine Möglichkeit, das Instrument der LCA mit der MCDA zu verknüpfen und veranschaulichen dies anhand einer Fallstudie aus dem Sektor der industriellen Lackierung. Hierbei wenden sie den Outranking-Ansatz PROMETHEE aus der europäischen Schule an und vergleichen die Ergebnisse mit einer Anwendung von MAUT und AHP. Sie kommen zunächst zu weitestgehend konsistenten Ergebnissen, wenngleich auch weiterer Forschungsbedarf bezüglich der Vor- und Nachteile der verschiedenen MCDA-Methoden aufgezeigt wird.

### 5. Einbeziehung der dynamischen Komponente

Der Ansatz von Oberschmidt et al. (2010) zielt darauf ab, die unterschiedlichen Energietechnologien der jeweiligen Entwicklungsphase zuzuordnen und somit individuell gewichten zu können. Ferner wird die Anwendung des Ansatzes anhand einer Fallstudie für das Bioenergiedorf Jühnde veranschaulicht. Die Fallstudie vergleicht vier alternative Möglichkeiten zur Elektrizitätserzeugung miteinander und teilt die Technologien und Kriterien in die vier Lebenszyklen „Einführungsphase“, „Wachstumsphase“, „Reifephase“ und „Sättigungsphase“ ein. Als MCDA-Methode wird sowohl PROMETHEE I als auch PROMETHEE II verwendet. Das Ergebnis wird in Form eines relativen Vergleichs der vier zur Verfügung stehenden Alternativen präsentiert. Ein ausführliches Review zum Einsatz von MCDA-Methoden bei der Bewertung von Bionergiesystemen findet sich ergänzend dazu bei Scott et al. (2012). Hingegen versuchen Domingues et al. (2015) in einer späteren Arbeit, die leichte Nutzfahrzeuge anhand ihrer Umweltbelastung bewertet, unter Verwendung von ELECTRE TRI, anders als Oberschmidt et al. (2010), eine absolute Evaluation jeder Alternative zu erhalten.

#### 5.0.1. Weitere Integrationsmöglichkeiten von Lebenszyklusmodellen und MCDA

Im Rahmen der Bewertung von Umweltbelastungen bei der Biomassenerzeugung, setzen Myllyviita et al. (2012) gezielt das SMART-Verfahren<sup>8</sup> in der Gewichtungphase der LCA ein, um die verschiedenen, im Produktionsprozess auftretenden, Umweltauswirkungen unterschiedlich stark in

die Evaluation einfließen zu lassen. Insgesamt bewerten die Autoren einen integrierten Ansatz von MCDA und LCA als geeignet, um dynamischen Unsicherheiten im Sinne der hier verwendeten Arbeitsdefinition zu begegnen, jedoch sehen sie noch weiteren Forschungsbedarf bezüglich der weiteren Integration von Werkzeugen der MCDA, beispielsweise zur Normalisierung von Daten.

Neben der Beurteilung von Auswirkungen auf die Umwelt mithilfe der LCA lassen sich sozioökonomische Auswirkungen wirtschaftlicher Aktivitäten gleichermaßen untersuchen. Dieses erweiterte Konzept findet sich etwa bei Macombe et al. (2013) unter dem Begriff SLCA (engl. Social Life Cycle Assessment). Neben dem Erfassen des State-of-the-Art der Lebenszyklusanalyse, evaluieren Macombe et al. im Rahmen ihrer Arbeit die sozioökonomischen Auswirkungen von Biodieselproduktion und erfassen somit eine weitere dynamische Unsicherheit methodisch. Wie auch Myllyviita et al. (2012) erachten sie die Verwendung von MCDA als methodischen Rahmen für die LCA beziehungsweise SLCA generell als geeignet, sehen jedoch noch Ausbesserungsbedarf in der methodischen Gestaltung dieser Integration.

#### 5.1. Dynamische Problemstrukturierung

Die bislang vorgestellten Ansätze erfassen die dynamische Komponente über eine Kombination von weiteren methodischen Werkzeugen mit den Methoden der MCDA. Für eine Erweiterung der herkömmlichen MCDA, etwa durch die Verwendung mehrerer Datensätze zu Alternativen und Kriterien über einen gewissen Zeitraum und deren methodische Einbeziehung in den Entscheidungsprozess, hat sich in der Literatur der Begriff der DMCDa entwickelt (Chen et al. (2010)). Die direkte Integration von dynamischen Aspekten in diesen DMCDa-Methoden und die methodische Entwicklung dieses Forschungsfeldes soll nun in diesem Abschnitt an repräsentativen Arbeiten aufgezeigt werden.

##### 5.1.1. Konzeptuelle Entwicklungen zu DMCDa-Modellen

Kornbluth (1992) präsentiert in seiner Arbeit einen empirischen Befund dafür, dass das Verändern der Kriteriengewichtung in einem mehrstufigen Entscheidungsprozess, bedingt durch äußere Entwicklungen, langfristig bessere Ergebnisse bezüglich der Entscheidungsqualität liefern kann.

Aufbauend auf der Arbeit von Henig und Buchanan (1996) entwickeln Corner et al. (2001) ein Konzept für eine dynamische Gestaltung des Problemstrukturierungsprozesses. Hiernach sollen sich Kriterien und Alternativen im Laufe des Prozesses jeweils gegenseitig generieren, anstelle einer statischen und getrennt voneinander stattfindenden Definition dieser beiden Elemente. Als Startpunkt kann im Rahmen dieser dynamischen Problemstrukturierung sowohl mit der Bestimmung von Alternativen über eine Alternativenfokussierte Denkweise (engl. Alternative-Focused Thinking, AFT), als auch mit der Festlegung von Kriterien durch eine Werte-orientierte Denkweise (engl. Value-Focused Thinking) begonnen werden.

Zusätzlich liefern Corner et al. noch ein illustratives Beispiel ihres Ansatzes und empirische Belege anhand von

<sup>8</sup>Methode zur Kriteriengewichtung auf Basis von vorher vergebenen Punkten als Orientierungswert und gewichteten linearen Durchschnitt. Für weitere Erläuterungen siehe (Von Winterfeldt und Edwards 1986 Kapitel 8.2)

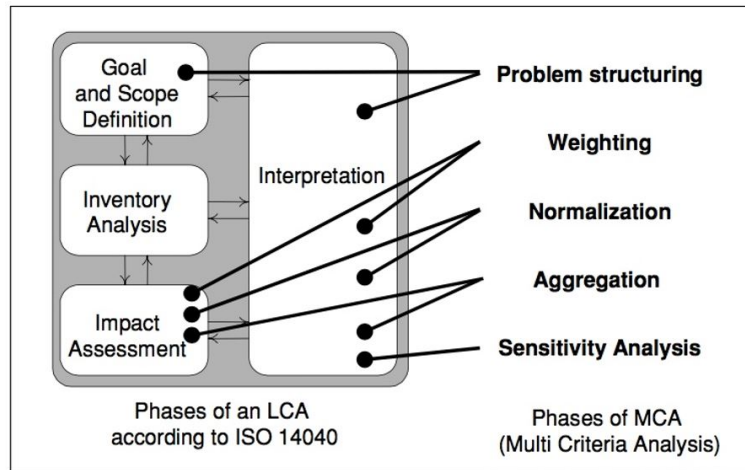


Abbildung 5: Verfahrensschritte der LCA und MCDA; Quelle: [Geldermann und Rentz (2005)]

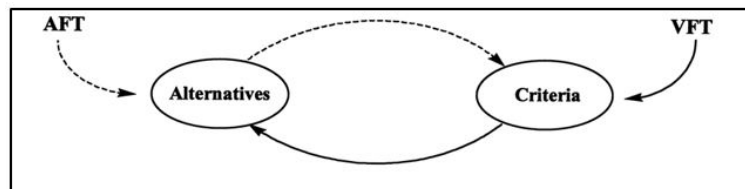


Abbildung 6: Dynamischer Problemstrukturierungsprozess nach Corner et al., Quelle: [Corner et al. (2001)]

Fallstudien und entscheidungstheoretischer Literatur. Saaty (2007) stellt drei verschiedene Herangehensweisen an zeitabhängige und somit dynamische Entscheidungen mithilfe des analytischen Hierarchieprozesses (AHP) vor und erläutert die mathematischen Hintergründe und Zusammenhänge der funktionalen Herangehensweise ausführlich:

1. Über die Integration von Szenarios mit klar definierten Zeitabschnitten in das Entscheidungsmodell und anschließend paarweisen Vergleichen für jeden Zeitabschnitt (strukturelle Herangehensweise)
2. Über paarweise Vergleiche zu verschiedenen Zeitpunkten und dem Aufzeigen der Entwicklung der relativen Änderungsrate im Zeitverlauf für das Vergleichspaar. Hieraus können zeitabhängige Urteile und Prioritäten abgeleitet werden (funktionale Herangehensweise)
3. Über paarweise Vergleiche anhand von mathematischen Funktionen und der Ableitung einer dynamischen Funktion aus diesen (hybride Herangehensweise)

#### 5.1.2. DMCD-Modelle basierend auf Feedback-Daten

In Pais und Ribeiro (2009) präsentieren die Autoren eine mögliche Architektur für die Gestaltung von DMCD-Problem auf Feedback-Basis. Die Besonderheit dieses iterativen Vorgehens liegt dabei im vorgeschlagenen dynamischen Evaluationsprozess. Hierbei wird ein historischer Datensatz zu Alternativenbewertungen aus der vorherigen Iteration mit dem Ergebnis der aktuellen Bewertungsprozedur aggregiert und somit nach jeder Iteration eine aktuelle Rangfolge an

Alternativen ausgegeben. Die Bewertungsprozedur basieren Pais und Ribeiro auf der Methode der einfachen additiven Gewichtung (engl. Weighted Sum Model, WSM).

Yu und Chen (2010) gelangen durch Integration von MCDA mit den Feldern der neuronalen Informationsverarbeitung und Psychologie zu einer Notwendigkeit von entscheidungstheoretischen Modellen mit veränderbaren Strukturelementen, liefern jedoch kein mathematisches Rahmenkonzept für ein solches DMCD-Modell. Dieses findet sich unter anderem bei Chen et al. (2010) anhand eines Beispiels aus dem medizinischen Notfallmanagement. Die Erweiterung zum ebenfalls präsentierten klassischen MCDA-Rahmenkonzept liegt in der zusätzlichen Verwendung von Entscheidungstabellen mit Daten vergangener Perioden im Entscheidungsprozess. Für die Gestaltung des Aggregationsprozesses werden drei Möglichkeiten aufgezeigt: mit Präferenz für neuere [ältere] Datensätze oder der Angabe eines Referenzzeitpunktes, um den die Präferenzen normalverteilt sind. Anschließend an diese Aggregation der Feedback-Daten schlagen Yu und Chen nach der Festlegung der Kriteriengewichtung eine auf DEA (engl. Data envelopment analysis) basierende Gesamtintegration zur Erlangung eines Ergebnisvektors für alle Alternativen vor. Campanella und Ribeiro (2011) präsentieren anknüpfend an die Arbeit von Yu und Chen einen Konzeptrahmen für DMCD mit einem numerischen Beispiel der Wahl eines Helikopterlandeplatzes. Beim vorgeschlagenen Rahmenkonzept handelt es sich, ähnlich zu Pais und Ribeiro (2009), um einen iterativen Prozess mit Verwendung einer „Memory“-Funktion in Form historischer

Datensätze. Ergänzend hierzu werden Richtlinien zur Datenspeicherung für die historischen Datensätze diskutiert, um sowohl eine gute Praktikabilität als auch eine möglichst hohe Ergebnisqualität zu erlangen. Das Abbruchkriterium sollte laut Campanella und Ribeiro je nach Problemkontext und –spezifität individuell gewählt werden. Mögliche Einsatzgebiete dieser DMCDAs sehen die Autoren im Notfallmanagement, der Patientendiagnose, der Luft- und Raumfahrt sowie bei der Lieferantwahl. Zu letzterem Anwendungsgebiet steuern Campanella et al. (2011) unter Verwendung des hier vorgestellten DMCDAs-Rahmenkonzeptes aus Campanella und Ribeiro (2011) eine ausführliche Fallstudie bei.

Zulueta et al. (2013) erweitern den Ansatz von Campanella und Ribeiro um einen selektiven und dynamischen Index, um für den Fall einer gleichen Bewertung zweier Alternativen die zeitliche Entwicklung der dynamischen Bewertung in die Entscheidung einzubeziehen und somit auch bei Indifferenz eine fundierte Entscheidung zu ermöglichen. Hierzu schlagen Zulueta et al. die Verwendung bipolarer Skalen im Aggregationsvorgang zur Beschreibung der Entwicklung der Alternativenbewertung im Zeitverlauf vor. Ein Wert von 0 impliziert hierbei keine Veränderung zwischen zwei aufeinanderfolgenden Perioden und ein Wert von 1 [-1] jeweils die größte normalisierte Verbesserung [Verschlechterung].

#### 5.1.3. DMCDAs-Modelle basierend auf Feedback- und Feedforward-Daten

Eine methodische Weiterentwicklung des Ansatzes von Campanella und Ribeiro (2011) um taktische Informationen bzw. Feedforward-Daten schlagen Jassbi et al. (2014) vor. Diese können beispielsweise auf Expertenschätzungen oder Vorhersagemodellen beruhen und bei taktischen und strategischen Geschäftsentscheidungen wie der Lieferantwahl neben historischen Daten in den Prozess der Entscheidungsfindung einbezogen werden. Für eine ausführliche Arbeit zu MCDA-Methoden für die Lieferantwahl sei an dieser Stelle auf den Reviewartikel von Ho et al. (2010) verwiesen. Die methodische Umsetzung dieses zusätzlichen Datensatzes erfolgt mithilfe einer weiteren Matrix zusätzlich zu den beiden bereits bestehenden Matrizen für die historischen Daten und der aktuellen Entscheidungstabelle, wie Abbildung 7 verdeutlicht. Zu jeder Iteration können diese Matrizen zusätzlich verändert werden. Hierdurch lassen sich historische Daten aktualisieren, verbessern und eine stets aktuelle Prognose berücksichtigen. Des Weiteren können bei jeder Iteration Alternativen und Kriterien verändert werden, was einen dynamischen und flexiblen Entscheidungsprozess garantiert.

Einen noch stärkeren Fokus auf zukünftige Datensätze legen Zolfani et al. (2016a) mit der Einführung eines Rahmenkonzeptes für PMADM-Modelle (engl. Prospective Multi-Attribute Decision Making). Hierbei wird die Entscheidungsmatrix neben Kriteriengewichtungen zusätzlich um das Setzen von Limitierungswerten und deren Eintrittswahrscheinlichkeit ergänzt. Diese Limitierungswerte repräsentieren äußere Einflüsse auf die Alternativenbewertungen, welche unabhängig von den Werten des Entscheidungsträgers

sind, aber dennoch zukünftig die Entscheidung beeinflussen könnten. Der Hauptunterschied zu Szenarien liegt laut Zolfani et al. darin, dass die bestmögliche Alternative keine Limitierung aufweist und Limitierungen somit eher als negative Szenarien zu verstehen sind, während Szenarien eine Spanne von möglichen Entwicklungen abdecken.

#### 5.1.4. Dynamische MCDA-Ansätze mit TOPSIS

Im Rahmen der Suche nach einem geeigneten Modell zur Auswahl von nachhaltigen und umweltfreundlichen Lieferantenbeziehungen diskutieren Orji und Wei (2015) den kombinierten Einsatz von System Dynamics und TOPSIS mit Alternativenbewertungen für vergangene, gegenwärtige und zukünftige Perioden. Hierbei wird TOPSIS zur Berechnung der normalisierten Punktwerte der Alternativen bzw. Lieferanten für einen entsprechenden Zeitraum verwendet und die hieraus erlangten Werte anschließend als Input für das auf System Dynamics basierende Selektionsmodell genutzt.

Anknüpfend an die DMCDAs-Methoden von Chen et al. (2010), Campanella und Ribeiro (2011) sowie Jassbi et al. (2014) entwickeln Watróbski et al. (2016) ein dynamisches Entscheidungsunterstützungsmodell unter der gleichzeitigen Verwendung einer Fuzzy TOPSIS sowie einer deterministischen TOPSIS-Methode zur Datenaggregation. Als Aggregationsstrategien wurden zum einen eine gleiche Gewichtung aller Zeitperioden und zum anderen eine Präferenz für aktuellere Perioden, bekannt aus Chen et al. (2010), gewählt. Watróbski et al. kommen zu dem Fazit, dass das untersuchte DMCDAs-Modell durch die Verwendung von Fuzzy TOPSIS und mehreren Aggregationsstrategien eine hohe Praktikabilität und Flexibilität bietet. Die Autoren sehen vor allem in der Untersuchung weiterer Aggregationsstrategien und einer damit verbundenen Modellabänderung weiteren Forschungsbedarf.

## 6. Vergleich der ausgewählten multikriteriellen Entscheidungsunterstützungssysteme

Ausgehend von den im vorhergehenden Abschnitt berichteten Befunden der Literaturanalyse werden nachfolgend die erzielten Ergebnisse näher diskutiert und damit gleichzeitig die vierte methodische Phase nach dem Schema von Fettke abgeschlossen.

Hierzu wird die in Kapitel vier vorgestellte Literatur auf Auffälligkeiten und Muster hin untersucht und im Hinblick auf den Beitrag zur Forschungsfrage kritisch bewertet. Auch die bei der Recherche verwendete Suchmethodik soll nachträglich durch das Aufzeigen von besonderen Auffälligkeiten und Hindernissen während des Suchprozesses kurz besprochen und bewertet werden, um Hinweise für zukünftige Arbeiten zu liefern.

Ziel dieses Kapitels ist es, durch Diskussion bisherige Erkenntnisse und eventuelle Forschungslücken auf dem Feld der dynamischen multikriteriellen Entscheidungsunterstützung aufzuzeigen, um im resümierenden Kapitel sechs zu einer Beantwortung der anfangs formulierten Forschungsfragen zu gelangen.

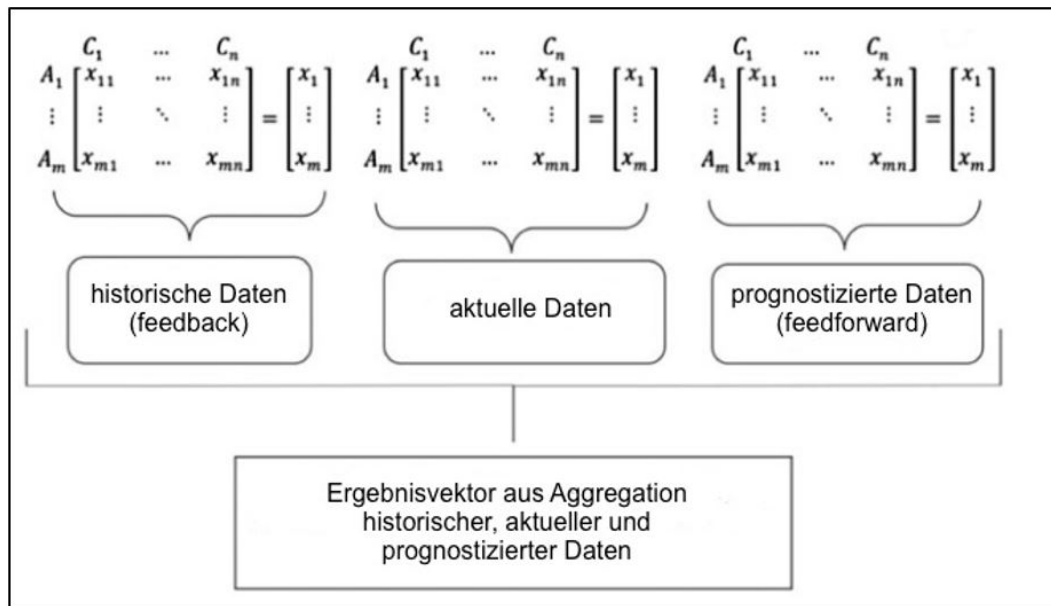


Abbildung 7: Erweitertes DMCDA-Modell von Jassbi et al.; Quelle: [eigene Darstellung nach Jassbi et al. (2014)]

### 6.1. Kritik bestehender Ansätze

Wie die Analyse der nach dem Suchprozess als relevant klassifizierten Literatur in Kapitel vier gezeigt hat, existieren verschiedene Möglichkeiten zur Integration von Dynamik in Form einer zeitlichen Komponente in MCDA-Methoden. Im Rahmen dieses Reviewartikels wurde hierbei auf drei Herangehensweisen besonderer Fokus gelegt, um eine methodische Entwicklung anhand repräsentativer Arbeiten aufzuzeigen.

#### 6.1.1. Szenario-basierte Ansätze

Die Entwicklung von MCDA-Ansätzen unter methodischem Einbezug von Szenarien beginnt im Jahr 1999 mit der Arbeit von Goodwin und Wright. Frühere Arbeiten zu konkreten Methoden mit Anwendungsbeispielen und Fallstudienberichten wurden im Rahmen der Literatursuche nicht identifiziert. Das Hauptziel von Szenario-basierten Ansätzen ist die Bestimmung der Auswirkung einer Alternativenauswahl innerhalb eines bestimmten Szenarios und der Vergleich mit den weiteren Szenario-Handlungsalternativen-Kombinationen. Aufgrund der Annahme, dass sich die Präferenzen der Entscheidungsträger über alle Szenarien hinweg stetig und konstant verhalten, fokussiert der Ansatz von Goodwin und Wright sich hierbei auf die Ergebnisse innerhalb der Szenarien und strebt keine globale Evaluation an. Hingegen gehen die späteren Weiterentwicklungen von Montibeller et al. (2006) und Stewart et al. (2013) explizit von unterschiedlichen Präferenzen für jedes Szenario aus. Diese Annahme erscheint vor allem im Anwendungsgebiet strategischer Entscheidungen sinnvoller, da externe Unsicherheiten und zeitliche Dynamiken somit flexibler berücksichtigt werden können. Legt ein Entscheidungsträger im Falle sehr guter Konjunkturentwicklungen geringere Präferenz auf kostenbezogene Kriterien, kann sich dies im Rezessions-Szenario entscheidend ändern (Scholten et al. (2014)).

Stewart und Durbach (2016) bewerten eine Integration von MCDA und Szenarioplanung insgesamt jedoch als leistungsfähiges Instrument mit dem Vorteil einer hohen Transparenz für die Entscheidungsträger. Ebenfalls sehen sie es als vorteilhaft an, dass sämtliche MCDA-Methoden hierbei ihre Verwendung finden können. Klärungsbedarf bestehe jedoch noch hinsichtlich der Anzahl festzulegender Szenarien und deren Konstruktionsweise. Als methodisch sinnvoller und transparenter Ansatz für eine möglichst objektive Szenariogenerierung erscheint der von Ribeiro et al. (2013) unterbreitete Vorschlag, welcher durch Formulierung von MILP-Modellen und anschließender Lösung in einer MILP-solver Software Szenarien generiert.

Nach Zolfani et al. (2016b) verwenden die bisher präsentierten Ansätze MADM-Methoden hauptsächlich als unterstützende Methode für die Szenarioplanung- und Auswertung. Die Autoren sprechen in diesem Zusammenhang von Szenario-basierten MADM-Methoden und schlagen gleichzeitig für die Entscheidungsfindung in einem dynamischen Umfeld ein MADM-basiertes Rahmenkonzept vor. Dieses versteht Szenarien lediglich als einen Teil des Entscheidungsprozesses zur besseren Erfassung der Zukunft, lässt jedoch generell auch andere Methoden als die Szenarioplanung für diesen Zweck zu.

#### 6.1.2. Kombination von MCDA und Lebenszyklusanalyse

Während die in dieser Arbeit vorgestellte Literatur zu Szenario-basierten Ansätzen für strategische Entscheidungen auf verschiedensten Themengebieten vorgeschlagen wurde, beschränkt sich das Anwendungsfeld der in Kapitel 4.2 präsentierten Arbeiten vor allem auf die Gebiete der nachhaltigen Entwicklung und Technologiebewertung. Zudem kann die LCA als zusätzliches methodisches Werkzeug lediglich die Dynamik von Technologien im Zeitverlauf erfassen. Für



eine vollständige Erfassung zusätzlicher dynamischer Komponenten im Sinne zeitlich bedingter äußerer Einflüsse ist zusätzlich die Verwendung weiterer Werkzeuge, wie etwa der Szenarioanalyse, nötig (Cinelli et al. (2013)).

Weiterhin ist bei der Beurteilung nachhaltiger Entscheidungen anzumerken, dass lediglich gut erforschte und dokumentierte Umweltauswirkungen im Rahmen der LCA-Analyse für die Entscheidungsfindung berücksichtigt werden. Bislang unbekannt und zum jetzigen Zeitpunkt nicht ersichtliche Auswirkungen werden aufgrund mangelnder Kenntnis ausgeklammert, was der Methodik lediglich eine beratende und keinesfalls definitive Rolle in der Entscheidungsfindung zukommen lässt (Mylyviita et al. (2012), S. 245).

Hinsichtlich der Wahl geeigneter MADM-Methoden für dieses Anwendungsgebiet zeigen sich sowohl die Ansätze der amerikanischen als auch die der europäischen Schule als geeignet. Vorteil für erstere ist vor allem die praktischere Handhabung. Fraglich ist jedoch, ob die aufgrund des hohen Aggregationsgrades mögliche Kompensation von negativen und positiven Kriterienausprägungen dieser Ansätze für das Treffen von nachhaltigen Entscheidungen erwünscht ist. Besonders in dieser Hinsicht zeigen sich die Outranking-Ansätze der europäischen Schule als deutlich weniger anfällig (Ober-schmidt et al. (2010), S. 185 f.; Cinelli et al. (2013)).

Insgesamt erscheint die Kombination von MCDA und LCA aufgrund der sich gegenseitig ergänzenden Stärken jedoch sinnvoll. Die Lebenszyklusanalyse kann durch die in Kapitel 4.2 beschriebene Datenerfassung und -verarbeitung möglicher Risiken und Unsicherheiten entscheidend dabei helfen, eine dynamische Komponente im Entscheidungsprozess methodisch zu erfassen. Die Wahl einer geeigneten MCDA-Methode unterstützt darüber hinaus Entscheidungsträgern dabei, diese generierten Daten sinnvoll im Entscheidungsprozess zu nutzen (Scott et al. (2016), S. 1918).

### 6.1.3. Methodische Entwicklung im Forschungsfeld der DMCD-Modelle

Der in Kapitel 4.3 präsentierte Forschungsstrang zu DMCD-Modellen berücksichtigt eine zeitliche Komponente auf zwei verschiedenen Wegen. Zum einen werden vergangene Informationen über Alternativen und Kriterien in einem iterativen Prozess in die gegenwärtige Entscheidungsfindung einbezogen und somit eine Lernfähigkeit modelliert. Zum anderen wird ebenso eine zukunftsbezogene Komponente durch die Prognose einer zukünftigen Entscheidungsmatrix inkludiert. Ebenso besteht somit die Möglichkeit, Kriterien und Alternativen hinzuzufügen oder zu entfernen (Jassbi et al. (2014), S. 236). Diese Feedforward-Funktion ermöglicht es dem Entscheidungsträger, ein zukünftiges Szenario ohne weitere methodische Ergänzungen zu berücksichtigen. Gänzlich ersetzen können die präsentierten DMCD-Modelle den kombinierten Einsatz von MCDA und Szenarioplanung jedoch noch nicht, da jeweils nur eine globale Gesamt-aggregation über alle Entscheidungsmatrizen durchgeführt wird und für eine vergleichende Auswertung mehrerer Szenarien somit mehrere Modelle parallel aufgestellt werden müssten.

Abhilfe hierzu könnten jedoch die von Zolfani et al. vorgeschlagenen PMADM-Ansätze schaffen, welche diese zeitliche Komponente über Limitierungen bzw. „negative Szenarien“ versuchen zu berücksichtigen. Anwendungsbeispiele für diesen Forschungsansatz ließen sich im Rahmen des Suchprozesses dieser Arbeit jedoch nicht identifizieren.

Ein Schwachpunkt der in Kapitel 4.3 präsentierten Methode von Campanella und Ribeiro ist sicherlich die Tatsache, dass sie nicht für Konsensentscheidungen ausgelegt ist, sondern lediglich für Anwendung durch einen einzelnen Entscheidungsträger geeignet ist (Campanella und Ribeiro (2011), S. 56). Dies gestaltet eine praktische Anwendung für strategische Entscheidungen schwierig, handelt es sich hierbei doch vorrangig um in der Gruppe getroffene Entscheidungen.

### 6.2. Auffälligkeiten und weiterer Forschungsbedarf

Die Ergebnisse der Suche offenbarten verschiedene Methoden zum Umgang mit Dynamik im Entscheidungsprozess und zahlreiche Anwendungsmöglichkeiten für diese. Das vielschichtige und variierte Verständnis von Dynamik in der Literatur und Forschung im Zusammenhang mit multi-kriteriellen Entscheidungsproblemen erschwerte den Suchprozess in den in Kapitel 3.2 genannten Datenbanken. Viele Autoren verwendeten nicht explizit den Begriff der Dynamik in den Titeln und Schlagworten Ihrer Arbeit. Zu den in Kapitel 2.2 vorgestellten MODM- und MADM-Methoden existieren bereits zahlreiche Reviewartikel zu unterschiedlichen Fragestellungen und Problemkontexten. So untersuchen Mendoza und Martins (2006) in Ihrer Arbeit die Anwendbarkeit von MCDA auf dem Gebiet des Managements natürlicher Ressourcen, Behzadian et al. (2010) untersuchen 217 Arbeiten aus wissenschaftlichen Zeitschriften auf PROMETHEE-Methoden und Ihre Anwendungsgebiete und Mardani et al. (2015a) behandeln extensiv die Anwendung von MCDA-Methoden und speziell Fuzzy MCDA im Zeitraum von 1994 bis 2014. Bei Scott et al. (2012) findet sich ein Reviewbeitrag zum Einsatz von MCDA-Methoden im Kontext von Bionergiesystementscheidungen und Ho et al. (2010) prüfen verwendete MCDA-Methoden bei der Lieferantenauswahl auf verwendete Kriterien und mögliche Verbesserungen. Weniger bestehende Reviewbeiträge wurden hingegen zu dynamischen MCDA-Methoden identifiziert. Eine aktuelle Arbeit zu ebendiesen von Zolfani et al. (2016a) stellt im Rahmen eines Reviews die Eignung von MADM-Methoden für den dynamischen Problemkontext heraus, diskutiert jüngste Beiträge und expliziert weiteren Forschungsbedarf auf diesem Gebiet.

Betrachtet man die als relevant klassifizierten Beiträge in Tabelle 2, fällt unter anderem die verhältnismäßig hohe Anzahl an Artikeln aus Journals ohne Ranking im Feld der DMCD-Ansätze auf. Liegt die Quote der in Journals mit einem A-Ranking veröffentlichten Beiträge zu Szenario-basierten Ansätzen noch bei 32%, so sind lediglich 20% der Beiträge zum Thema der DMCD in einem Journal mit Ranking von A oder B veröffentlicht. Der überwiegende Anteil (53%) der Beiträge zu diesem Themengebiet ist hierbei in

vom Verband für Hochschullehrer e.V. nicht bewerteten Journals erschienen. Die Quote der in A oder B-Journals veröffentlichten Artikel zu MCDA und Lebenszyklusanalyse beträgt 50%. Da im Rahmen dieser Arbeit ausdrücklich kein Anspruch auf eine vollständige Erfassung sämtlicher relevanter Literatur gelegt wurde bleibt offen, ob diese Auffälligkeit auf der gewählten Charakteristik dieses Reviewbeitrages oder einer Forschungslücke im vergleichsweise jungen Gebiet der DMCD-Methoden beruht. Für letztere These spricht zudem die hohe Anzahl an Anwendungsbeispielen innerhalb der Arbeiten zu den in Kapitel 4.1 und 4.2 präsentierten Methoden, während die repräsentativ für das Forschungsfeld der DMCD-Modelle betrachteten Ansätze eher methodische Rahmenkonzepte besprechen und in numerischen Beispielen anstelle praxisbezogener Anwendungsfälle angewandt werden.

## 7. Schlussbetrachtung

“Some reviews end abruptly with a short conclusion. However, even though you have completed the majority of your review paper at this point, you can still tell your colleagues more. For instance, [...] to draw implications for practice and future theorizing” (Webster und Watson (2002), S. 20)

Existieren zu den etablierten Methoden der multikriteriellen Entscheidungsunterstützung bereits zahlreiche Anwendungsbeispiele sowie Reviewbeiträge, war es die Aufgabe dieser Arbeit explizit den derzeitigen State-of-the-Art des vergleichsweise jungen Forschungsfeldes der dynamischen MCDA-Methoden herauszustellen. Hierzu sollten, mithilfe einer strukturierten Literaturrecherche, Ansätze zur Integration einer zeitlichen Komponente in MCDA-Methoden herausgearbeitet werden.

Hierzu wurden 51 Beiträge aus wissenschaftlichen Zeitschriften sowie ausgewählten Buchveröffentlichungen nach einem methodischen Schema strukturiert ausgewertet und aufbereitet. Durch Anwendung dieses methodischen Schemas offenbarten sich drei grundsätzliche Ansätze zur Integration zeitlicher Aspekte in die MCDA, abhängig vom Problemkontext und dem Verständnis der Dynamik: Über die Kombination von MCDA-Methoden mit der Szenarioplanung, der Lebenszyklusanalyse oder über eigenständige DMCD-Modelle ohne weitere Hilfsmethodiken.

Die Analyse der Szenario-basierten Ansätze zeigte neben Rahmenkonzepten zudem einige Anwendungsbeispiele, was für eine fortgeschrittene Entwicklung in diesem Forschungsfeld spricht. Das vorgestellte Rahmenkonzept von Goodwin und Wright auf Basis der MAVT erfreut sich in diesem Forschungsfeld einer großen Beliebtheit. Als Anknüpfungspunkt für zukünftige Forschung wurde vorwiegend die Konstruktionsweise sowie die optimale Anzahl der verwendeten Szenarien identifiziert. Die Kombination von MCDA und LCA offenbart ihre Stärken vorallem im Anwendungsgebiet der nachhaltigen Entwicklung. Die Recherche offenbarte, dass auf die-

sem Gebiet bereits zahlreiche Anwendungsbeispiele vorliegen. Für eine hohe Ergebnisqualität eignet sich besonders die Verwendung von Outranking-Ansätzen, allerdings auf Kosten der Benutzerfreundlichkeit. Zudem erscheint es fraglich, ob eine vollständige Erfassung der zeitlichen Komponente im Sinne der vorliegenden Definition von Dynamik gewährleistet ist.

Als besser geeignet zu dieser vollständigen Erfassung erweisen sich die DMCD-Ansätze mit gleichzeitiger Berücksichtigung vergangener und zukünftiger Daten über mehrere Entscheidungsmatrizen. Dieser neuerliche Forschungsstrang birgt zudem noch am meisten Entwicklungspotential. Konkrete Ansatzpunkte hierzu sind etwa die Entwicklung einer Methodik für Konsensentscheidungen sowie das Untersuchen des Aggregationsprozesses.

## Literatur

- Aouni, B., Colapinto, C., La Torre, D., Liuzzi, D., und Marsiglio, S. On dynamic multiple criteria decision making models: A goal programming approach. In *Multiple criteria decision making in finance, insurance and investment*, pages 31–48. Springer, 2015.
- Behzadian, M., Kazemzadeh, R. B., Albadvi, A., und Aghdasi, M. Promethee: A comprehensive literature review on methodologies and applications. *European journal of Operational research*, 200(1):198–215, 2010.
- Belton, V. und Stewart, T. *Multiple criteria decision analysis: an integrated approach*. Springer Science & Business Media, 2002.
- Belton, V. und Stewart, T. Problem structuring and multiple criteria decision analysis. In *Trends in multiple criteria decision analysis*, pages 209–239. Springer, 2010.
- Benítez, J., Delgado-Galván, X., Izquierdo, J., und Pérez-García, R. An approach to ahp decision in a dynamic context. *Decision Support Systems*, 53(3):499–506, 2012.
- Braune, I., Pinkwart, A., und Reeg, M. Book of abstracts / 5th Dubrovnik Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems, September 29th - October 3rd 2009, Dubrovnik, Croatia: UNESCO sponsored conference. Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, Zagreb 2009, 2009.
- Cairns, G., Goodwin, P., und Wright, G. A decision-analysis-based framework for analysing stakeholder behaviour in scenario planning. *European Journal of Operational Research*, 249(3):1050–1062, 2016.
- Campanella, G. und Ribeiro, R. A. A framework for dynamic multiple-criteria decision making. *Decision Support Systems*, 52(1):52–60, 2011.
- Campanella, G., Pereira, A., Ribeiro, R. A., und Varela, M. L. R. Collaborative dynamic decision making: A case study from b2b supplier selection. In *Euro Working Group Workshop on Decision Support Systems*, pages 88–102. Springer, 2011.
- Chen, Y., Li, K. W., und He, S. Dynamic multiple criteria decision analysis with application in emergency management assessment. In *Systems Man and Cybernetics (SMC), 2010 IEEE International Conference on*, pages 3513–3517. IEEE, 2010.
- Cinelli, M., Coles, R., und Kirwan, K. Use of multi criteria decision analysis to support life cycle sustainability assessment: An analysis of the appropriateness of the available methods. In *The 6th International Conference on Life Cycle Management*, pages 25–28, 2013.
- Cooper, H. M. Organizing knowledge syntheses: A taxonomy of literature reviews. *Knowledge in society*, 1(1):104–126, 1988.
- Cooper, H. und Hedges, L. *The Handbook of research synthesis*. Russell Sage Foundation, New York, 1994.
- Corner, J., Buchanan, J., und Henig, M. Dynamic decision problem structuring. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 10(3):129–141, 2001.
- Crousillat, E. O., Dorfner, P., Alvarado, P., und Merrill, H. M. Conflicting objectives and risk in power system planning. *IEEE Transactions on Power Systems*, 8(3):887–893, 1993.
- Diakoulaki, D. und Grafakos, S. Externalities of Energy: Extension of Accounting Framework and Policy Applications. National Technical University Athens, 2004.
- Domingues, A. R., Marques, P., Garcia, R., Freire, F., und Dias, L. C. Applying multi-criteria decision analysis to the life-cycle assessment of vehicles. *Journal of cleaner production*, 107:749–759, 2015.
- Durbach, I. N. und Stewart, T. J. Modeling uncertainty in multi-criteria decision analysis. *European Journal of Operational Research*, 223(1):1–14, 2012.
- Ehrgott, M., Figueira, J., und Greco, S. *Trends in multiple criteria decision analysis*. Springer, New York, 2010.
- Fettke, P. State-of-the-art des state-of-the-art. *Wirtschaftsinformatik*, 48(4): 257, 2006.
- Figueira, J., Greco, S., Ehrgott, M., und Henggeler Antunes, C. Multiple criteria decision analysis: state of the art surveys. (International series in operations research & management science 78); Springer, New York.
- Fishburn, P. C. und Lavalley, I. H. Mcda: theory, practice and the future. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 8(1):1–2, 1999.
- Frini, A. A multi-criteria multi-period approach for energy project selection in sustainable development context. In *Green Energy, 2014 International Conference on*, pages 65–71. IEEE, 2014.
- Gardfield, E. Reviewing review literature. part 1: definitions and uses of reviews. *Current Contents. Essays of an Information Scientist*, 10(18):113–116, 1987.
- Geldermann, J. und Rentz, O. Multi-criteria analysis for technique assessment: Case study from industrial coating. *Journal of Industrial Ecology*, 9(3):127–142, 2005.
- Gerking, H. Modeling of multi-stage decision-making processes in multi-period energy-models. *European Journal of Operational Research*, 32(2): 191–204, 1987.
- Goodwin, P. und Wright, G. Enhancing strategy evaluation in scenario planning: a role for decision analysis. *Journal of management studies*, 38(1): 1–16, 2001.
- Goodwin, P. und Wright, G. *Decision Analysis for Management Judgment 5th ed.* Number 5th. John Wiley and sons, 2014.
- Gorenstin, B., Campodonico, N., Costa, J., und Pereira, M. Power system expansion planning under uncertainty. *IEEE Transactions on Power Systems*, 8(1):129–136, 1993.
- Great Britain, Department for Communities and Local Government. Multi-criteria analysis: a manual. Communities and Local Government, Wetherby, 2009.
- Guinée, J. B. Handbook on life cycle assessment operational guide to the iso standards. *The international journal of life cycle assessment*, 7(5):311–313, 2002.
- Halog, A. und Manik, Y. Advancing integrated systems modelling framework for life cycle sustainability assessment. *Sustainability*, 3(2):469–499, 2011.
- Henig, M. I. und Buchanan, J. T. Solving mcdm problems: Process concepts. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 5(1):3–21, 1996.
- Hermann, B., Kroeze, C., und Jawjit, W. Assessing environmental performance by combining life cycle assessment, multi-criteria analysis and environmental performance indicators. *Journal of Cleaner Production*, 15(18):1787–1796, 2007.
- Hites, R., De Smet, Y., Risse, N., Salazar-Neumann, M., und Vincke, P. About the applicability of mcdm to some robustness problems. *European Journal of Operational Research*, 174(1):322–332, 2006.
- Ho, W., Xu, X., und Dey, P. K. Multi-criteria decision making approaches for supplier evaluation and selection: A literature review. *European Journal of operational research*, 202(1):16–24, 2010.
- Jasch, C. Environmental performance evaluation and indicators. *Journal of Cleaner Production*, 8(1):79–88, 2000.
- Jassbi, J. J., Ribeiro, R. A., und Varela, L. R. Dynamic mcdm with future knowledge for supplier selection. *Journal of Decision Systems*, 23(3):232–248, 2014.
- Jiang, L., Liu, H., Martínez, L., und Cai, J. A model for linguistic dynamic multi-criteria decision-making. In *Foundations of Intelligent Systems*, pages 939–949. Springer, 2014.
- Kallrath, J. *Gemischt-ganzzahlige Optimierung: Modellierung in der Praxis: Mit Fallstudien aus Chemie, Energiewirtschaft, Metallgewerbe, Produktion und Logistik*. Springer-Verlag, 2013.
- Keynes, J. M. The general theory of employment. *The quarterly journal of economics*, 51(2):209–223, 1937.
- Kilgour, D. M., Chen, Y., und Hipel, K. W. Multiple criteria approaches to group decision and negotiation. In *Trends in multiple criteria decision analysis*, pages 317–338. Springer, 2010.
- Kluczek, A. Application of multi-criteria approach for sustainability assessment of manufacturing processes. *Management and Production Engineering Review*, 7(3):62–78, 2016.
- Kornbluth, J. Dynamic multi-criteria decision making. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 1(2):81–92, 1992.
- Labuschagne, C. und Brent, A. C. Sustainable project life cycle management: the need to integrate life cycles in the manufacturing sector. *International Journal of Project Management*, 23(2):159–168, 2005.
- Lienert, J., Scholten, L., Egger, C., und Maurer, M. Structured decision-making for sustainable water infrastructure planning and four future scenarios. *EURO Journal on Decision Processes*, 3(1-2):107–140, 2015.
- Light, R. und Pillemer, D. *Summing up*. Harvard University Press, 1984.
- Lin, Y.-H., Lee, P.-C., und Ting, H.-I. Dynamic multi-attribute decision making model with grey number evaluations. *Expert Systems with Applications*, 35(4):1638–1644, 2008.
- Linares, P. Multiple criteria decision making and risk analysis as risk management tools for power systems planning. *IEEE Transactions on Power Systems*, 17(3):895–900, 2002.
- Macombe, C., Leskinen, P., Feschet, P., und Antikainen, R. Social life cycle assessment of biodiesel production at three levels: a literature review and

- development needs. *Journal of Cleaner Production*, 52:205–216, 2013.
- Manten, A. A. Scientific literature review. *Scholarly Publishing*, 5:75–89, 1973.
- Mardani, A., Jusoh, A., MD Nor, K., Khalifah, Z., Zakwan, N., und Valipour, A. Multiple criteria decision-making techniques and their applications—a review of the literature from 2000 to 2014. *Economic Research-Ekonomska Istraživanja*, 28(1):516–571, 2015a.
- Mardani, A., Jusoh, A., und Zavadskas, E. K. Fuzzy multiple criteria decision-making techniques and applications—two decades review from 1994 to 2014. *Expert Systems with Applications*, 42(8):4126–4148, 2015b.
- Matsatsinis, N. F. und Samaras, A. P. Mcdm and preference disaggregation in group decision support systems. *European Journal of Operational Research*, 130(2):414–429, 2001.
- Mendoza, G. A. und Martins, H. Multi-criteria decision analysis in natural resource management: a critical review of methods and new modelling paradigms. *Forest ecology and management*, 230(1-3):1–22, 2006.
- Millán, J., Campo, R., und Sánchez-Sierra, G. A modular system for decision-making support in generation expansion planning (super). *IEEE transactions on power systems*, 13(2):667–671, 1998.
- Miranda, V. und Proenca, L. M. Why risk analysis outperforms probabilistic choice as the effective decision support paradigm for power system planning. *IEEE Transactions on Power Systems*, 13(2):643–648, 1998.
- Montibeller, G., Gummer, H., und Tumidei, D. Combining scenario planning and multi-criteria decision analysis in practice. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 14(1-3):5–20, 2006.
- Munda, G. Multiple criteria decision analysis and sustainable development. In *Multiple Criteria Decision Analysis*, pages 1235–1267. Springer, 2016.
- Münzberg, T., Wiens, M., und Schultmann, F. Dynamic-spatial vulnerability assessments: a methodical review for decision support in emergency planning for power outages. *Procedia Engineering*, 78:78–87, 2014.
- Myllyviita, T., Holma, A., Antikainen, R., Lähtinen, K., und Leskinen, P. Assessing environmental impacts of biomass production chains—application of life cycle assessment (lca) and multi-criteria decision analysis (mcdm). *Journal of cleaner production*, 29:238–245, 2012.
- Oberschmidt, J., Geldermann, J., Ludwig, J., und Schmehl, M. Modified promethee approach for assessing energy technologies. *International Journal of Energy Sector Management*, 4(2):183–212, 2010.
- Omann, I. *Multi-criteria decision aid as an approach for sustainable development analysis and implementation*. Graz, 2004.
- Onat, N. C., Kucukvar, M., Tatari, O., und Zheng, Q. P. Combined application of multi-criteria optimization and life-cycle sustainability assessment for optimal distribution of alternative passenger cars in us. *Journal of Cleaner Production*, 112:291–307, 2016.
- Orji, I. J. und Wei, S. Dynamic modeling of sustainable operation in green manufacturing environment. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 26(8):1201–1217, 2015.
- Pais, T. C. und Ribeiro, R. A. Contributions to dynamic multicriteria decision making models. In *IFSA/EUSFLAT Conf*, pages 719–724. Citeseer, 2009.
- Phillips, L. *Tackling strategic problems: the role of group decision support*. SAGE Publications, London; Newbury Park, Calif, 1990.
- Pictet, J. und Bollinger, D. The silent negotiation or how to elicit collective information for group mcdm without excessive discussion. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 13(5-6):199–211, 2005.
- Polatidis, H., Haralambopoulos, D. A., Kemp, R., und Rothman, D. Creating an energy system that we want but don't know yet, using integrated assessment, transition management and multi-criteria analysis. *Integrated Assessment*, 4(3):205–213, 2003.
- Polatidis, H., Haralambopoulos, D. A., Munda, G., und Vreeker, R. Selecting an appropriate multi-criteria decision analysis technique for renewable energy planning. *Energy Sources, Part B*, 1(2):181–193, 2006.
- Ram, C. und Montibeller, G. Exploring the impact of evaluating strategic options in a scenario-based multi-criteria framework. *Technological Forecasting and Social Change*, 80(4):657–672, 2013.
- Reichert, P., Langhans, S. D., Lienert, J., und Schuwirth, N. The conceptual foundation of environmental decision support. *Journal of environmental management*, 154:316–332, 2015.
- Rezaei, J. Best-worst multi-criteria decision-making method. *Omega*, 53:49–57, 2015.
- Ribeiro, F., Ferreira, P., und Araújo, M. Evaluating future scenarios for the power generation sector using a multi-criteria decision analysis (mcdm) tool: The portuguese case. *Energy*, 52:126–136, 2013.
- Saaty, T. L. Time dependent decision-making; dynamic priorities in the ahp/ansp: Generalizing from points to functions and from real to complex variables. *Mathematical and Computer Modelling*, 46(7-8):860–891, 2007.
- Schmuck, P. et al. Transdisciplinary evaluation of energy scenarios for a german village using multi-criteria decision analysis. *Sustainability*, 4(4):604–629, 2012.
- Scholten, L., Scheidegger, A., Reichert, P., Mauer, M., und Lienert, J. Strategic rehabilitation planning of piped water networks using multi-criteria decision analysis. *Water research*, 49:124–143, 2014.
- Scholten, L., Schuwirth, N., Reichert, P., und Lienert, J. Tackling uncertainty in multi-criteria decision analysis—an application to water supply infrastructure planning. *European Journal of Operational Research*, 242(1):243–260, 2015.
- Scott, J. A., Ho, W., und Dey, P. K. A review of multi-criteria decision-making methods for bioenergy systems. *Energy*, 42(1):146–156, 2012.
- Scott, R. P., Cullen, A. C., Fox-Lent, C., und Linkov, I. Can carbon nanomaterials improve czts photovoltaic devices? evaluation of performance and impacts using integrated life-cycle assessment and decision analysis. *Risk Analysis*, 36(10):1916–1935, 2016.
- Stewart, T. J. A critical survey on the status of multiple criteria decision making theory and practice. *Omega*, 20(5-6):569–586, 1992.
- Stewart, T. J., French, S., und Rios, J. Integrating multicriteria decision analysis and scenario planning—review and extension. *Omega*, 41(4):679–688, 2013.
- Stewart, T. und Durbach, I. Dealing with Uncertainties in MCDA; in: *Multiple Criteria Decision Analysis*, Band 233; hrsg. v. Greco S, Ehrgott M, Figueira JR; Springer New York, S. 467–496, 2016.
- Vaillancourt, K. und Waub, J.-P. Equity in international greenhouse gases abatement scenarios: A multicriteria approach. *European Journal of Operational Research*, 153(2):489–505, 2004.
- Virgo, J. A. The review article: its characteristics and problems. *The Library Quarterly*, 41(4):275–291, 1971.
- Watrobski, J., Jankowski, J., und Ziemia, P. Multistage performance modelling in digital marketing management. *Economics & Sociology*, 9(2):101–125, 2016.
- Webster, J. und Watson, R. T. Analyzing the past to prepare for the future: Writing a literature review. *MIS quarterly*, pages xiii–xxiii, 2002.
- Wilkens, I. *Multikriterielle analyse zur nachhaltigkeitsbewertung von energiesystemen-von der theorie zur praktischen anwendung*. 2012.
- Wright, G. und Goodwin, P. Future-focussed thinking: combining scenario planning with decision analysis. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 8(6):311–321, 1999.
- Xu, B. und Ouenniche, J. Performance evaluation of competing forecasting models: A multidimensional framework based on mcdm. *Expert Systems with Applications*, 39(9):8312–8324, 2012.
- Yu, P.-L. und Chen, Y.-C. Dynamic mcdm, habitual domains and competence set analysis for effective decision making in changeable spaces. In *Trends in multiple criteria decision analysis*, pages 1–35. Springer, 2010.
- Zahir, S. Aggregation of priorities in multi-criteria decision analysis (mcdm): Connecting decision spaces in the cognitive space. *American Journal of Operations Research*, 6(04):317–333, 2016.
- Zheng, J., Egger, C., und Lienert, J. A scenario-based mcdm framework for wastewater infrastructure planning under uncertainty. *Journal of environmental management*, 183:895–908, 2016.
- Zimmermann, H.-J. und Gutsche, L. *Multi-Criteria Analyse*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 1991.
- Zolfani, S., Maknoon, R., und Zavadskas, E. K. An introduction to prospective multiple attribute decision making (pmadm). *Technological and Economic Development of Economy*, 22(2):309–326, 2016a.
- Zolfani, S. H., Maknoon, R., und Zavadskas, E. K. Madm and futures studies; a necessity. In *Conference: 9th International Scientific Conference "Business and Management"*, 2016b.
- Zulueta, Y., Martínez-Moreno, J., Martínez, L., und Espinilla, M. A discriminative dynamic index based on bipolar aggregation operators for supporting dynamic multi-criteria decision making. In *Aggregation Functions in Theory and in Practise*, pages 237–248. Springer, 2013.