

---

# **Sustainable Management, Wertschöpfung und Effizienz**

## **Reihe herausgegeben von**

G. Weber, Breunigweiler, Deutschland

M. Bodemann, Warburg, Deutschland

R. Schmidpeter, Ingolstadt, Deutschland

In dieser Schriftenreihe stehen insbesondere empirische und praxisnahe Studien zu nachhaltigem Wirtschaften und Effizienz im Mittelpunkt. Energie-, Umwelt-, Nachhaltigkeits-, CSR-, Innovations-, Risiko- und integrierte Managementsysteme sind nur einige Beispiele, die Sie hier wiederfinden. Ein besonderer Fokus liegt dabei auf dem Nutzen, den solche Systeme für die Anwendung in der Praxis bieten, um zu helfen die globalen Nachhaltigkeitsziele (SDGs) umzusetzen. Publiziert werden nationale und internationale wissenschaftliche Arbeiten. Die Reihe *Sustainable Management, Wertschöpfung und Effizienz* wird von Gregor Weber, Markus Bodemann und René Schmidpeter herausgegeben.

This series is focusing on empirical and practical research in the fields of sustainable management and efficiency. Management systems in the context of energy, environment, sustainability, CSR, innovation, risk as well as integrated management systems are just a few examples which can be found here. A special focus is on the value such systems can offer for the application in practice supporting the implementation of the global sustainable development goals, the SDGs. National and international scientific publications are published (English and German). The series *Sustainable Management, Value Added and Efficiency* is published by Gregor Weber, Markus Bodemann and René Schmidpeter.

Weitere Bände in der Reihe <http://www.springer.com/series/15909>

---

Christoph Kolotzek

Entwicklung einer  
nachhaltigkeitsorientierten  
Rohstoffbewertung  
zur Unterstützung von  
Entscheidungsprozessen  
in Unternehmen

 Springer Gabler

Christoph Kolotzek  
Augsburg, Deutschland

Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades Dr.-Ing. eingereicht an der Mathematisch-Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät der Universität Augsburg von Christoph Kolotzek, M.Sc., Augsburg, Oktober 2017

Erstgutachter: Prof. Dr. Axel Tuma  
Zweitgutachter: Prof. Dr. Armin Reller  
Tag der mündlichen Prüfung: 08.12.2017

ISSN 2523-8620 ISSN 2523-8639 (electronic)  
Sustainable Management, Wertschöpfung und Effizienz  
ISBN 978-3-658-22391-5 ISBN 978-3-658-22392-2 (eBook)  
<https://doi.org/10.1007/978-3-658-22392-2>

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

Springer Gabler

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, ein Teil von Springer Nature 2018

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Gabler ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH und ist ein Teil von Springer Nature  
Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

## Vorwort

Die hier vorliegende Arbeit basiert auf Erkenntnissen des Praxisprojekts „Nachhaltige Ressourcenstrategien in Unternehmen: Identifikation kritischer Rohstoffe und Erarbeitung von Handlungsempfehlungen zur Umsetzung einer ressourceneffizienten Produktion“, das in Zusammenarbeit mit der *Deutschen Bundesstiftung Umwelt* und der Arbeitsgruppe *Resource Lab* der Universität Augsburg am Lehrstuhl für *Production & Supply Chain Management (PSCM)* durchgeführt wurde (DBU-Projekt: Nr. 30438). Als Projektergebnis wurde ein Leitfaden veröffentlicht, der im Verlauf der hier vorliegenden Arbeit als *Tuma et al. (2014)* zitiert wird. Darüber hinaus wurden einzelne Elemente der hier vorliegenden Arbeit im Rahmen eines Forschungsartikels in einer englischsprachigen Fachzeitschrift veröffentlicht. Dieser Artikel wird im Verlauf der hier vorliegenden Arbeit als *Kolotzek et al. (2018)* zitiert.

## Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis .....	IX
Abbildungsverzeichnis .....	XV
Tabellenverzeichnis .....	XVII
1 Motivation .....	1
2 Anforderungsprofil einer nachhaltigkeitsorientierten Rohstoffbewertung zur Unterstützung von Entscheidungsprozessen in Unternehmen .....	5
2.1 Einführende Betrachtung der Begriffe Rohstoff und Nachhaltigkeit.....	5
2.2 Rohstofforientierte Nachhaltigkeitsaspekte im unternehmerischen Kontext.....	7
2.3 Methoden zur nachhaltigkeitsorientierten Rohstoffbewertung in Unternehmen .....	10
2.3.1 Forschungsbereich der Kritikalitätsanalyse .....	13
2.3.2 Grundlagen des Life Cycle Impact Assessments .....	17
2.3.3 Methode des Social Life Cycle Assessments .....	19
2.4 Anwendung von Kritikalitätsbewertungen im unternehmerischen Kontext.....	21
2.4.1 Rohstoffidentifikation als vorgelagerter Arbeitsschritt.....	23
2.4.2 Ableitung rohstofforientierter Handlungsempfehlungen .....	23
3 Konzeption einer kritikalitätsbasierten Rohstoffbewertung auf Basis ökonomischer, ökologischer und sozialer Indikatoren .....	25
3.1 Methodische Vorgehensweise bei der Entwicklung des Bewertungsmodells.....	26
3.2 Integration der Rohstoffidentifikation .....	27
3.3 Integration der Ableitung rohstofforientierter Handlungsalternativen .....	28
4 Konzeptionierung des nachhaltigkeitsorientierten Rohstoffbewertungsmodells .....	31
4.1 Strukturierung der Bewertungsdimensionen .....	32
4.1.1 Verfügbarkeitsrisiko .....	32
4.1.2 Umweltauswirkungen.....	43

---

4.1.3 Soziale Verhältnisse.....	45
4.2 Implementierung berücksichtigter Indikatoren.....	47
4.3 Gewichtungproblematik in Mehrindikatorsystemen .....	49
4.4 Zusammenfassung der Ergebnisse .....	55
5 Evaluierung, Analyse und Weiterentwicklung des konzeptionierten Bewertungsmodells 57	
5.1 Evaluierung des konzeptionierten Modells.....	57
5.2 Sensitivitätsanalyse resultierender Ergebnisse.....	62
5.3 Das entwickelte Rohstoffbewertungsmodell.....	71
5.4 Visualisierung der Rohstoffbewertungsergebnisse .....	75
6 Integration des Modells in unternehmerische Prozesse.....	79
6.1 Leitfaden zur Integrationsunterstützung.....	79
6.2 Fallstudie zur Anwendung des Bewertungsmodells .....	83
7 Zusammenfassung und Ausblick .....	91
Literaturverzeichnis.....	97
Anhang.....	119
A.1 Ergänzende Angaben zu den Expertenbefragungen.....	119
A.2 Ergänzende Angaben zur Berechnung verwendeter Indikatoren.....	124
A.2.1 Dimension Verfügbarkeitsrisiko .....	124
A.2.2 Dimension Umweltauswirkungen .....	129
A.2.3 Dimension Soziale Verhältnisse .....	131
A.2.4 Berücksichtigung von Datenlücken.....	138
A.3 Ergänzende Angaben zur Weiterentwicklung des Modells.....	159
A.4 Ergänzende Angaben zur Methode der Energiedispersiven Röntgenfluoreszenzanalyse.....	169

## Abkürzungsverzeichnis

### Verfügbarkeitsrisiko, Abkürzungen verwendeter Indikatoren:

Kop	Koppelproduktionsanteil (Companion Metal Fraction)
LKonzP	Konzentration der Produktion auf Länderebene (Country Concentration)
NdZT	Nachfrageanstieg durch Zukunftstechnologien (Future Demand Technology)
PP	Länderrisiko Policy Perception (Country Risk Policy Perception)
PS	Länderrisiko Politische Stabilität (Country Risk Political Stability)
Reg	Länderrisiko Regulation (Country Risk Regulation)
RR	Recyclingrate (Recycling Rate)
SRRC	Statische Reichweite der Ressourcen (Static Reach Resources)
SRRV	Statische Reichweite der Reserven (Static Reach Reserves)
Subs	Substituierbarkeit (Substitutability)
UKonzP	Konzentration der Produktion auf Unternehmensebene (Company Concentration)



**Verfügbarkeitsrisiko, Abkürzungen verwendeter Kriterien:**

RKonz	Risiko der Konzentration (Concentration Risk)
RNA	Risiko des Nachfrageanstiegs (Demand Increase Risk)
PoIR	Politisches Risiko (Political Risk)
RAR	Risiko der Angebotsreduzierung (Supply Reduction Risk)

**Umweltauswirkungen, Abkürzungen verwendeter Indikatoren:**

ALO	Agricultural Land Occupation
CCEq	Climate Change, Ecosystem Quality
CCHH	Climate Change, Human Health
FEct	Freshwater Ecotoxicity
FEut	Freshwater Eutrophication
HT	Human Toxicity
IR	Ionising Radiation
MEct	Marine Ecotoxicity
NLT	Natural Land Transformation
OD	Ozone Depletion
PMF	Particulate Matter Formation
POF	Photochemical Oxidant Formation
TAcid	Terrestrial Acidification
TEct	Terrestrial Ecotoxicity
ULO	Urban Land Occupation

**Soziale Verhältnisse, Abkürzungen verwendeter Indikatoren:**

AIR	Achtung der indigenen Rechte (Respect of Indigenous Rights)
AS	Arbeitsstunden (Working Hours)
EB	Engagement für die Bevölkerung (Community Engagement)
CD	Chancengleichheit/Diskriminierung (Equal Opportunities/Discrimination)
D&M	Delokalisierung und Migration (Delocalization and Migration)
FL	Faire Löhne (Fair Salary)
G&GLB	Geschützte und gesunde Lebensbedingungen (Safe and Healthy Living Conditions)
G&S	Gesundheit und Sicherheit (Health and Safety)
KA	Kinderarbeit (Child Labor)
Kor	Korruption (Corruption)
LB	Lokale Beschäftigung (Local Employment)
PABK	Prävention und Abschwächung bewaffneter Konflikte (Prevention and Mitigation of Armed Conflicts)
SLB	Sichere Lebensbedingungen (Secure Living Conditions)
VFT	Vereinigungsfreiheit und Freiheit für Tarifverhandlungen (Freedom of Association and Bargaining)
ZA	Zwangsarbeit (Forced Labor)
ZIR	Zugang zu immateriellen Ressourcen (Access to immaterial resources)
ZMR	Zugang zu materiellen Ressourcen (Access to material resources)

**Soziale Verhältnisse, Abkürzungen verwendeter Zwischenkriterien:**

LokB-Zug	Lokale Bevölkerung - Zugang
LokB-Kul	Lokale Bevölkerung - Kultur
LokB-Bed	Lokale Bevölkerung - Bedingungen
Arb-Re	Arbeiter - Rechte
Arb-Bed	Arbeiter - Bedingungen
Arb-UA	Arbeiter - Unfreiwillige Arbeit

**Soziale Verhältnisse, Abkürzungen verwendeter Kriterien:**

LokB	Lokale Bevölkerung (Local Community)
Ges	Gesellschaft (Society)
Arb	Arbeiter (Worker)

**Abkürzungen verwendeter Fachbegriffe:**

AHP	Analytischer Hierarchieprozess
CR	Corporate Responsibility
CS	Corporate Sustainability
CSR	Corporate Social Responsibility
DSS	Decision Support System
GCSM	Green Supply Chain Management
HDI	Human Development Index
KMU	kleine und mittelständische Unternehmen
LCA	Life Cycle Assessment
LCIA	Life Cycle Impact Assessment
MADA	Multi-Attribute Decision Making
MAUT	Multiattribute Utility Theory
MCDA	Multi Criteria Decision Analysis
MODM	Multi-Objective Decision Making
PCJM	Pairwise Comparison Judgement Matrix (Ergebnismatrix)
RHB	Roh-, Hilfs- und Betriebsstoff
SHDB	Social Hotspots Database
SLCA	Social Life Cycle Assessment
SSCM	Sustainable Supply Chain Management
UNEP	United Nations Environment Programme

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Konzepte des Sustainable Supply Chain Managements.....	11
Abbildung 2: Auswertung der Relevanzbewertung für die 28 identifizierten Verfügbarkeitsindikatoren.....	38
Abbildung 3: Zusammenfassung der Ergebnisse zur Ableitung des finalen Sets aus elf Indikatoren (K4-inkl.) der Dimension Verfügbarkeitsrisiko.....	42
Abbildung 4: Struktur der Bewertungsdimension Verfügbarkeitsrisiko. Abkürzungen für Indikatoren und Kriterien sind in Klammern angegeben.....	43
Abbildung 5: Gliederung der sozialen Bewertungsdimension zur Durchführung der AHP-Analyse.....	53
Abbildung 6: Grundstruktur des entwickelten Rohstoffbewertungsmodells.....	56
Abbildung 7: Darstellung verwendeter Transformationsvorschriften (TF).....	65
Abbildung 8: Fertigstellung des entwickelten Rohstoffbewertungsmodells.....	72
Abbildung 9: Entwickelte Ergebnisvisualisierung von Kritikalitätsbewertungen am Beispiel von Tantal.....	76
Abbildung 10: Entwickelte Ergebnisvisualisierung zur Identifikation sozialer Brennpunkte auf Länderebene am Beispiel von Tantal.....	77
Abbildung 11: Entwickeltes unternehmensorientiertes Ablaufmodell.....	80
Abbildung 12: Identifikation der Inhaltsstoffe eines Tantalkondensators.....	82
Abbildung 13: Ergebnisse der Bewertung hinsichtlich aller drei Nachhaltigkeits- dimensionen für die Rohstoffe a) Aluminium, b) Niob und c) Tantal.....	85
Abbildung 14: Detaillierte Bewertung der Sozialen Verhältnisse auf Länderebene für die Rohstoffe a) Aluminium, b) Niob und c) Tantal.....	87
Abbildung 15: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse zur Fallstudie der Kondensatorselektion.....	89
Abbildung A-16: Auszug aus dem ersten Fragebogen (FB-1) zur Bewertung der Relevanz einzelner Verfügbarkeitsrisikoindikatoren. Gezeigt ist eine Expertenbewertung.....	121

---

Abbildung A-17: Auszug aus dem zweiten Fragebogen (FB-2) zur Durchführung der paarweisen Vergleiche innerhalb der Dimension Verfügbarkeitsrisiko. Gezeigt ist eine Expertenbewertung.....	122
Abbildung A-18: Auszug aus dem dritten Fragebogen (FB-3) zur Durchführung der paarweisen Vergleiche innerhalb der sozialen Dimension.....	123
Abbildung A-19: Streudiagramm zur Korrelationsanalyse der Indikatoren der Dimension Verfügbarkeitsrisiko.....	162
Abbildung A-20: Streudiagramm zur Korrelationsanalyse der Indikatoren der Dimension Soziale Verhältnisse.....	163

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Kategorisierung von 28 Indikatoren aus 24 Studien zur Bestimmung eines Rohstoffverfügbarkeitsrisikos.....	33
Tabelle 2: Kurzbeschreibung der 28 aus der Literatur identifizierten Indikatoren zur Bestimmung eines Rohstoffverfügbarkeitsrisikos. ....	36
Tabelle 3: Kategorisierung der 28 identifizierten Verfügbarkeitsindikatoren in die vier definierten Kategorien K1 bis K4. ....	40
Tabelle 4: Bewertung der Anwendbarkeit und Relevanz vorhandener Wirkungsindikatoren zur Konstruktion der sozialen Bewertungsdimension.....	46
Tabelle 5: Skalenwerte paarweiser Vergleiche bei der AHP-Analyse. ....	50
Tabelle 6: PCJMs zur Bestimmung der Indikatorgewichtungen in der Bewertungsdimension Verfügbarkeitsrisiko.....	51
Tabelle 7: Unterteilung der Unterkriterien der sozialen Bewertungsdimension in Zwischenkriterien. ....	52
Tabelle 8: PCJMs zur Bestimmung der Gewichtungen einzelner Unterkriterien in der sozialen Bewertungsdimension.....	54
Tabelle 9: Bewertungsergebnisse mit dem Grundmodell in der Dimension Verfügbarkeitsrisiko für fünf ausgewählte Rohstoffe (Ag, Cu, Mg, V und Zn). ....	58
Tabelle 10: Korrelationskoeffizienten der Indikatoren der Bewertungsdimension Verfügbarkeitsrisiko. Abkürzungen entsprechend Abbildung 6.....	60
Tabelle 11: Korrelationskoeffizienten der Indikatoren der Bewertungsdimension Soziale Verhältnisse. Abkürzungen entsprechend Abbildung 6. ....	61
Tabelle 12: Betrachtung verwendeter Transformationsvorschriften (TF).....	66
Tabelle 13: Ergebnisse der Variation der Berechnungsvorschriften für die Dimension des Verfügbarkeitsrisikos.....	67
Tabelle 14: Ergebnisse der Variation der Berechnungsvorschriften für die soziale Bewertungsdimension. ....	67
Tabelle 15: Indikatorgewichtungen (Prozent) der sechs betrachteten Varianten. ....	69

Tabelle 16: Vergleich der Robustheit des fertiggestellten Bewertungsmodells. ....	70
Tabelle 17: Kritikalitätswerte je Kriterium und Dimension für berücksichtigte Rohstoffe, berechnet mit dem fertiggestellten Bewertungsmodell. ....	74
Tabelle A-18: Teilnehmende Experten (✓) an den drei Befragungen mittels Fragebogen (FB-1 bis FB-3).....	119
Tabelle A-19: Details zur Berechnung verwendeter Indikatoren, Dimension Verfügbarkeitsrisiko. ....	124
Tabelle A-20: Details zur Berechnung verwendeter Indikatoren, Dimension Umweltauswirkungen. ....	129
Tabelle A-21: Details zur Berechnung verwendeter Indikatoren, Dimension Soziale Verhältnisse. ....	132
Tabelle A-22: Berücksichtigte Rohstoffe (Ag bis Fe) mit zugehörigen Produktionsländern. Produktionsjahr 2014, Angaben in Prozent. ....	139
Tabelle A-23: Berücksichtigte Rohstoffe (Gd bis Pr) mit zugehörigen Produktionsländern. Produktionsjahr 2014, Angaben in Prozent. ....	143
Tabelle A-24: Berücksichtigte Rohstoffe (Pt bis Zr) mit zugehörigen Produktionsländern. Produktionsjahr 2014, Angaben in Prozent. ....	147
Tabelle A-25: Annahmen für Datenlücken länderbasierter Indikatoren, Teil 1. ....	151
Tabelle A-26: Annahmen für Datenlücken länderbasierter Indikatoren, Teil 2. ....	155
Tabelle A-27: Indikatorwerte innerhalb der Dimension Verfügbarkeitsrisiko, berechnet mit dem Grundmodell. ....	159
Tabelle A-28: Indikatorwerte innerhalb der Dimension Verfügbarkeitsrisiko, Unterschiede im fertiggestellten Modell im Vergleich zum Grundmodell. ....	160
Tabelle A-29: Indikatorwerte der sozialen Bewertungsdimension, Teil 1. ....	160
Tabelle A-30: Indikatorwerte der sozialen Bewertungsdimension, Teil 2. ....	161
Tabelle A-31: Verwendete Standardabweichungen bei der Monte-Carlo-Simulation zur Berücksichtigung von Unsicherheit der Indikatorrohdaten. ....	164
Tabelle A-32: Transformationsszenarien (TFSC) mit zugehörigen Varianten der Indikatorberechnung (TF). Dimension Verfügbarkeitsrisiko. ....	165
Tabelle A-33: Unter- und Obergrenzen zur Variation der Indikatorgewichtungen im Rahmen der Gewichtungsoptimierung. ....	166



---

Tabelle A-34: Ergebnisse der Robustheitsanalyse für das Verfügbarkeitsrisiko. ....	167
Tabelle A-35: Ergebnisse der Robustheitsanalyse für die soziale Dimension. ....	168