

FfE

Radar für die holistische
Bewertung von Treibhausgas-
verminderungsmaßnahmen in der
Industrie

Beitrag in der ET – Energiewirtschaftliche Tagesfragen, Ausgabe 7/8 2020
Andrej Guminski (FfE GmbH), Serafin von Roon (FfE GmbH)

Radar für die holistische Bewertung von Treibhausgasverminderungsmaßnahmen in der Industrie

Bei der Bewertung von Treibhausgas (THG)-Verminderungsmaßnahmen wird der Fokus meist auf techno-ökonomische Aspekte gelegt, und das obwohl eine Reihe von weiteren ökologischen, rechtlichen und sozio-politischen Kriterien für eine holistische Bewertung berücksichtigt werden sollten. Nachfolgend wird ein Ansatz zur ganzheitlichen Bewertung von industriellen THG-Verminderungsmaßnahmen vorgestellt. Hierzu zählt u.a. das Radar zur holistischen Bewertung industrieller THG-Verminderungsmaßnahmen, welches Entscheidungsträger aus Wirtschaft und Politik bei der Maßnahmenbewertung unterstützen soll.

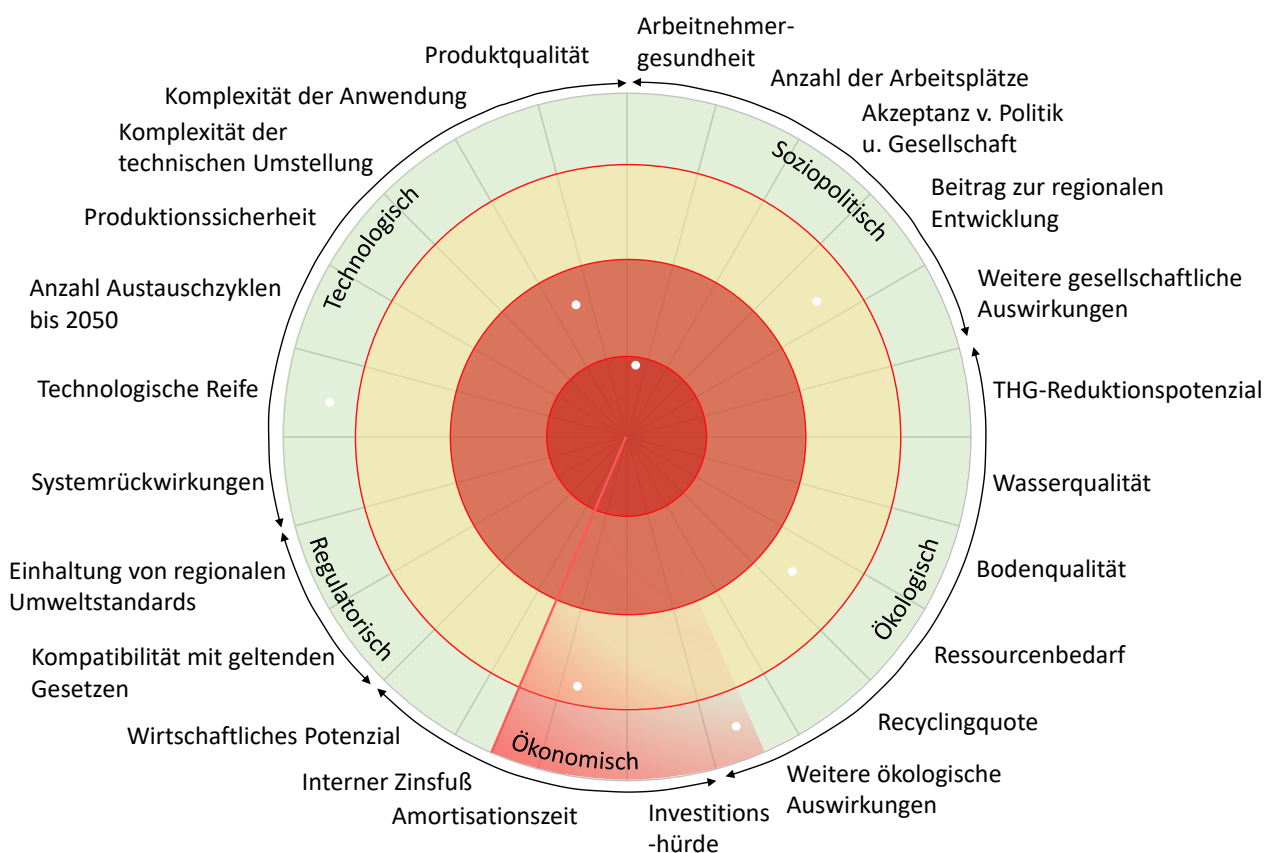


Abbildung 1: Radar für die holistische Bewertung von THG-Verminderungsmaßnahmen in der Industrie

Der Mehrwert des Radars (Abb. 1) ergibt sich aus den nachfolgenden drei Aspekten:

- Das Entscheidungsproblem wird strukturiert und die relevanten Bewertungsdimensionen aufgezeigt.
- Durch ein Ampelsystem wird eine praxistaugliche Bewertung der Maßnahme(n) je Kriterium ermöglicht
- Die Kriterienclusterung, das Ampelsystem sowie eine Reihe von Ausschlusskriterien erleichtern die Identifikation einzelner Hemmnisbereiche.

Die Bewertungsergebnisse stellen die Grundlage für die Ableitung von Strategien zur Hemmnisbewältigung dar. In Abhängigkeit der Stakeholderperspektive können dies sowohl politisch-regulatorische Maßnahmen als auch Argumentationsketten für die Beseitigung unternehmensinterner Widerstände sein.

Ausgangspunkt und Inspiration für die Erstellung des Bewertungsradars

Ausgangspunkt und Inspiration für die Erstellung des Bewertungsradars sind die in [1] und durch eigene Überlegungen identifizierten Schwachstellen (Abb. 2) der gängigsten wissenschaftlichen techno-ökonomischen und ökologischen Bewertungsmethode für Verminderungsmaßnahmen, den sog. klassischen THG-Verminderungskostenkurven (VKK) [2].

Tabelle 1: Nachteile statischer Verminderungskostenkurven [1]

Nachteile klassischer Verminderungskostenkurven	Möglichkeiten/ Methoden zur Entkräftung der Nachteile	Literatur
Datentransparenz and -qualität		
Inkonsistente Basisdaten (z. B. Emissionsfaktoren, Energieträgerpreise)	Einheitliche und transparente Datengrundlage wählen	[4], [5]
Vernachlässigung von Maßnahmeninterdependenzen	Berücksichtigung von Wechselwirkungen bei Maßnahmendefinition und -auswahl	
Unklarheiten hinsichtlich der Kostenperspektive (Stark) Vereinfachte Technologiekostenstruktur	Ergänzende Matrix-Visualisierung	[5-8]
Unzureichende Berücksichtigung von Unsicherheiten	Primärdatenutzung und Sensitivitätsanalysen inkl. Darstellung in erweiterter Verminderungskostenkurve	[4], [12]
Intra- und intersektorale Systemrückwirkungen von Einzelmaßnahmen und Maßnahmenkombinationen		
Keine Berücksichtigung von Pfadabhängigkeiten	Berechnung dynamischer Treibhausgasverminderungskosten und Bewertung der Energiesystemrückwirkungen in Szenarioanalysen	[5], [19-23]
Keine Berücksichtigung von intertemporalen Effekten		
Keine Berücksichtigung von Energiesystemrückwirkungen		
Weiterführende Kriterien und Relevanz in der Praxis		
Vernachlässigung weiterer relevanter Bewertungskriterien	Erweiterung des Bewertungsablaufs um das FfE-Bewertungsradar	Dieser Beitrag

Anhand von Beispielen und Verweisen auf weiterführende Literatur, werden Möglichkeiten zur Abschwächung der zentralen Nachteile von VKK vorgestellt. Anschließend wird die relativ praxisferne Maßnahmenbewertung mittels VKK um weitere Kriterien ergänzt. Hierdurch wird einer der zentralen Kritikpunkte der VKK entkräftet. Schlussendlich ergibt sich ein idealtypischer Bewertungsablauf, der sowohl systemische als auch praxisnahe Bewertungskriterien umfasst.

Was sind zentrale Nachteile der Maßnahmenbewertung mittels statischer Verminderungskostenkurven?

Um zu bewerten welche Maßnahmen für die kostengünstige Erreichung nationaler oder unternehmensspezifischer Emissionsminderungsziele umgesetzt werden müssen, bietet sich die Maßnahmenbewertung mittels THG-Verminderungskosten (VK) an. Insbesondere der Maßnahmenvergleich mittels einer VKK kann Entscheidungsträger dabei unterstützen, die für die Emissionsminderung benötigten Maßnahmen und Kosten der Maßnahmenumsetzung abzuschätzen. Die Nutzung der Kurven als Entscheidungsgrundlage birgt jedoch die Gefahr der Fehlinterpretation. Abb. 2 zeigt einige der zentralen Nachteile von THG-VKK, die bei deren Nutzung entsprechend adressiert werden sollten.

Wie können zentrale Nachteile der techno-ökonomischen Bewertung abgeschwächt werden?

Die Nachteile der statischen VKK können in drei Kategorien eingeteilt werden:

- Datentransparenz and -qualität;
- Intra- und intersektorale Systemrückwirkungen von Einzelmaßnahmen und Maßnahmenkombinationen;
- Weiterführende Kriterien.

Grundlage für die Berechnung klassischer VKK (z. B. [2], [3]) sind in der Regel eine Vielzahl von techno-ökonomischen und ökologischen Annahmen (z. B. Technologiekosten, Energieträgerpreise, Emissionsfaktoren, Energieverbräuche, Zinssätze und Technologieumsetzungsraten). Durch die starke Komplexitätsreduktion in der Darstellung rücken die zugrundeliegenden Annahmen jedoch in den Hintergrund und eröffnen einen Raum für Fehlinterpretation.

Durch die Wahl von einheitlichen Rahmenparametern, die transparente Darstellung der zugrundeliegenden Daten und Annahmen sowie der Berücksichtigung von Wechselwirkungen zwischen Maßnahmen bei der Maßnahmendefinition und -auswahl kann ein Schritt zur Entkräftung dieser Nachteile geleistet werden. In [4] und [5] wird ein Prozess zur Nutzung von Primär- und Sekundärdaten für die Aufbereitung von Maßnahmen zur THG-Verminderung in der Industrie skizziert. Durch einen mehrstufigen Validierungsprozess, die Veröffentlichung der

zugrundeliegenden Annahmen und Daten sowie der Verwendung eines einheitlichen Rahmendatensatzes wird gewährleistet, dass die Berechnungsgrundlage für alle Maßnahmen identisch ist. Für den Nutzer der statischen VKK bietet sich so die Möglichkeit, die zugrundeliegenden Basisdaten einzusehen und zu interpretieren.

Da durch Transparenz bei der Darstellung der Basisdaten nicht zwangsläufig sichergestellt werden kann, dass diese bei der Interpretation auch berücksichtigt werden, wird in [6], [7], [8] und [5] vorgeschlagen, die sog. Verminderungskostenmatrix (VKM) als ergänzende oder alternative Darstellung zur klassischen VKK heranzuziehen (Abb. 3). Daraus ergeben sich insbesondere in Kombination mit der klassischen VKK folgende Vorteile:

- Die Verminderungskosten resultieren aus der Kosten- (Zähler) und Emissionsdifferenz (Nenner). Hohe/niedrige VK können folglich sowohl durch geringe/hohe Emissionsdifferenzen als auch hohe/geringe Kostendifferenzen erzeugt werden. Die VKM zeigt diese Differenzen je Maßnahme auf und erlaubt somit genauere Rückschlüsse hinsichtlich der Höhe der VK.
- Die VKM verleitet nicht dazu, die Verminderungspotenziale und -kosten der einzelnen Maßnahmen zu aggregieren. Dies kann zu Fehlinterpretationen führen, da Wechselwirkungen zwischen Maßnahmen auftreten können.
- Durch die Darstellung wird die Kostenstruktur (Anteil fixe und variable Kosten) und -perspektive (betriebswirtschaftliche oder systemische bzw. volkswirtschaftliche Perspektive) der dargestellten Verminderungsmaßnahmen offengelegt. Die Darstellung liefert somit erste Indikatoren für die Auswahl besonders relevanter Sensitivitätsparameter.

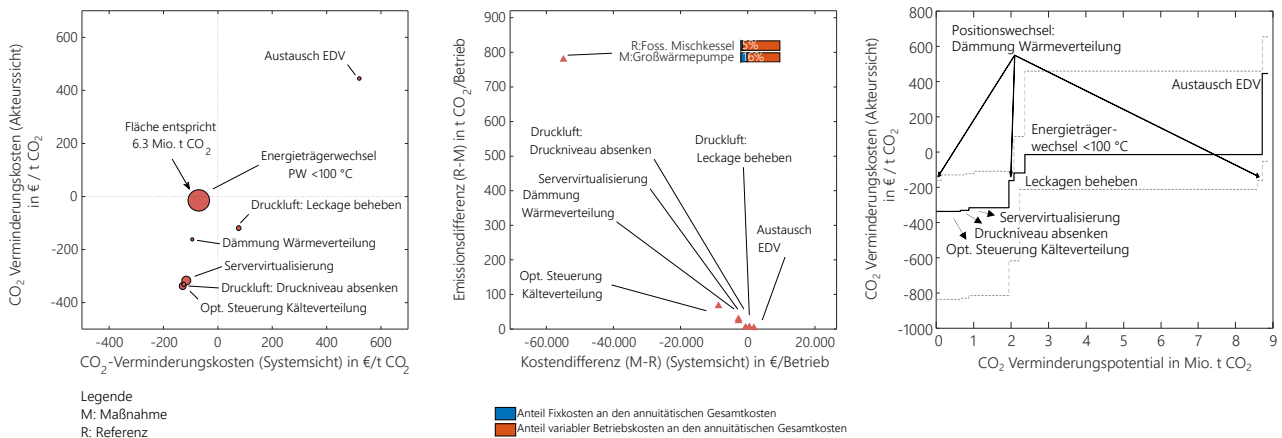


Abbildung 2: Die Verminderungskostenmatrix [5], [8], [12]

Die in Abb. 3 dargestellten Maßnahmen aus dem Bereich der Querschnittstechnologien (QST) basieren auf Realdaten aus den Lernenden Energieeffizienz Netzwerken (LEEN) und Energieaudits der FfE [9], [5]. Grundlage sind ca. 2.500 QST-Maßnahmen, aus denen 28 höher aggregiert Maßnahmenbündel hergeleitet wurden. Durch die Aufbereitung der Maßnahmen basierend auf Primärdaten, sowie die Berechnung der VK auf Grundlage eines einheitlichen Rahmendatensatzes wurden in diesem Beispiel bereits bei der Maßnahmendefinition zentrale Nachteile klassischer VK entkräftet. Details zu den Maßnahmen können dem Datenanhang aus [10] entnommen werden.

Um dem Nachteil der mangelnden Darstellung von Daten- und Modellunsicherheiten auf die Höhe der Verminderungskosten weiter zu entkräften, wurde die statische VKK in Abb. 3 (rechtes Diagramm) zudem um obere und untere VKK ergänzt. Diese ergeben sich aus der Variation der Industriestrompreise zwischen dem Minimum (48 €/MWh) und Maximum aus dem 2. Halbjahr 2019 (174 €/MWh) [11], [12].

Bei der Maßnahmendefinition wurde ein durchschnittlicher Betrieb zugrunde gelegt, damit diese im Anschluss Eingang in die Industriesektormodellierung finden konnten. Potenzial für die Umsetzung der Maßnahmen besteht

jedoch sowohl für Großverbraucher (Befreiung von Steuern und Umlagen) als auch kleinere Betriebe (geringere Strompreisentlastung). Die obere und untere VKK zeigt somit, wie stark die Verminderungskosten einer Maßnahme in Abhängigkeit des Akteurs schwanken können. Darüber hinaus kommt es zu einem Positionswechsel der Maßnahme Dämmung der Wärmeverteilung, da diese zu einer Reduktion des Brennstoffverbrauchs führt und folglich nicht von der Strompreisvariation betroffen ist.

Trotz ergänzender Diagramme und Analysen sind statische VK nur begrenzt aussagekräftig

Trotz erhöhter Datentransparenz, Sorgfalt bei der Datenaufbereitung und Darstellungsergänzung und -erweiterung sind statische Verminderungskosten(kurven) dennoch nicht geeignet um,

- Pfadabhängigkeiten,
- Intertemporale Effekte und
- Energiesystemrückwirkungen

adäquat zu bewerten. In [5] wurde das Konzept der sektor- und systemdynamischen Verminderungskosten eingeführt, um diese Aspekte in den VK zu berücksichtigen. Dabei werden in der sektordynamischen Bewertung intrasektorale Rückwirkungen und in der systemdynamischen Bewertung darüber hinaus intersektorale Rückwirkungen beachtet.

Die Berücksichtigung der Pfadabhängigkeiten und intertemporalen Effekte erfolgt durch die Berechnung der VK auf Basis der kumulierten Emissions- und Kostenveränderungen. Bei der Berechnung der systemdynamischen VK wird zudem die Reaktion des Energiesystems aufgrund der Umsetzung einer Einzelmaßnahme untersucht und bei der Berechnung der VK berücksichtigt.

Die Auswertungen aus [5] zeigen, dass die Umsetzung von Effizienzmaßnahmen in der Industrie bei systemdynamischer Bewertung höhere Verminderungskosten aufweisen als in der statischen und sektordynamischen Bewertung. Grund hierfür ist, dass der niedrigere Stromverbrauch zu einer geringeren Auslastung der Grenzkraftwerke führt, diese daraufhin ineffizienter betrieben werden und somit spezifische Kosten- und der Stromemissionsfaktor steigen. Trotz der hieraus resultierenden höheren Emissionsminderung durch die Maßnahmenumsetzung, kommt es zu einem Anstieg der Verminderungskosten aufgrund der erhöhten spezifischen Kosten im Bereitstellungssektor.

Die Beispiele zur Erhöhung der Datentransparenz und Berücksichtigung zusätzlicher inter- und intrasektoraler Effekte führen zu einer Verbesserung der techno-ökonomischen Analyse von THG-Verminderungskosten. Abb. 2 zeigt, dass ein weiterer Kritikpunkt an klassischen VK(K) (der auch für dynamische VK gilt) die fehlende Berücksichtigung zusätzlicher Bewertungskriterien ist. Sowohl bei der wissenschaftlichen als auch praktischen Bewertung von Verminderungsmaßnahmen können diese Kriterien jedoch entscheidend für den Erfolg einer Maßnahme sein. Daher wird das Konzept der VKK durch das Bewertungsradar für industrielle Verminderungsmaßnahmen erweitert. Hieraus ergibt sich ein idealtypischer Bewertungsablauf gem. Abb. 4.

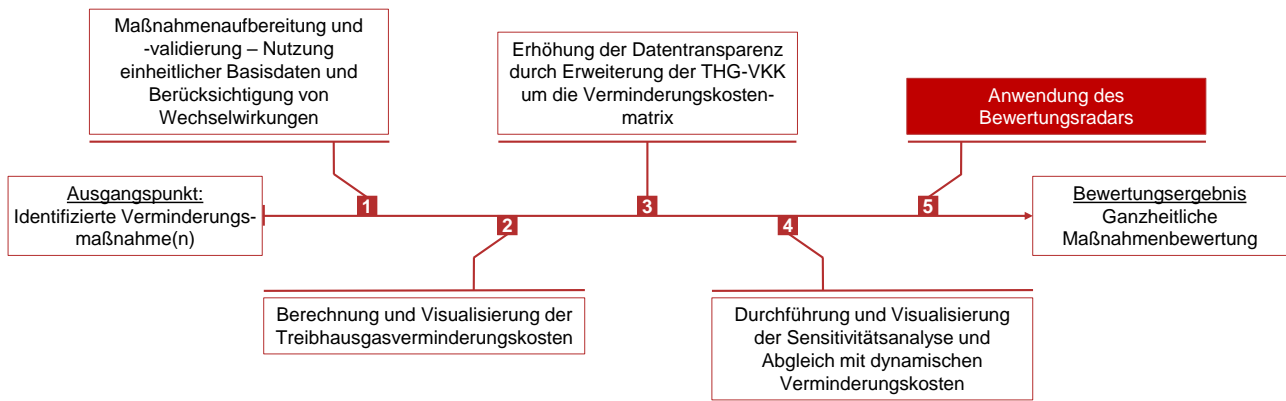


Abbildung 3: Idealisierter Ablauf für die ganzheitliche Bewertung von THG-Verminderungsmaßnahmen

Welche zusätzlichen Kriterien sind für die Bewertung von THG-Verminderungsmaßnahmen relevant?

Die Metaanalysen [13] und [14] zeigen, dass bereits eine Vielzahl von multikriteriellen Analysen (MKA) zur Entscheidungsträgern bei der Technologie- bzw. Maßnahmenauswahl im Energie- und Nachhaltigkeitsbereich existieren. Auch konkret auf den Industriesektor zugeschnittene Entscheidungsunterstützungssysteme (EUS), wie z. B. [15] (industrielle Anlagen im Allgemeinen), [16] (Zementbranche) und [17] (Stahlherstellung), wurden in der Vergangenheit entwickelt. Das Bewertungsradar unterscheidet sich von den bisherigen Analysen wie folgt:

1. Das Radar stellt eine Entscheidungshilfe für Stakeholder aus Wirtschaft und Politik dar. In der Regel werden EUS für eine Perspektive definiert
2. Ziel des Radars ist die Bewertung von Einzeltechnologien sowie Technologiepaaren, nicht die Ermittlung einer eindeutigen Rangfolge aus einer Liste von Alternativen.
3. Aus 1 und 2 geht hervor, dass das Radar Gültigkeit für eine Bandbreite an Bewertungssituationen besitzt. Es erfolgt keine Kriteriengewichtung, da die Gewichte stark von der Entscheidungsperspektive und den definierten Alternativen abhängen [14]
4. Anstatt der Kriteriengewichtung erfolgt die Definition von perspektivenunabhängigen Ausschlusskriterien, die dazu dienen dem Anwender schwerwiegende Hemmnisse für die Maßnahmenumsetzung aufzeigen.

In der Regel wird der in Abb. 5 dargestellte achtstufige Prozess zur Erstellung eines multikriteriellen Bewertungsradars durchlaufen. Für das Bewertungsradar werden die Schritte fünf und sechs adaptiert. Schritt acht entfällt vollständig.

Tabelle 2: Arbeitsschritte zur Erstellung multikriterieller Entscheidungsunterstützungssysteme [13]

Arbeitsschritte der multikriteriellen Analyse	Charakterisierung der Arbeitsschritte für die 360° Methode
1. Kontextdefinition – Definition des Entscheidungsproblems und der Entscheidungsträger/innen	Bewertung industrieller Treibhausgasverminderungsmaßnahmen durch Entscheidungsträger aus Wirtschaft, Politik und Wissenschaft
2. Definition der zu bewertenden Alternativen	Industrielle Treibhausgasverminderungsmaßnahmen
3. Definition der Kriterien- und Ausprägungen	24 Kriterien in 5 Clustern
4. Normalisierung der Ergebnisskalen und Bewertung der Alternativen je Kriterium	Ampelsystem
5. Gewichtung der Kriterien	Definition von Ausschlusskriterien - keine Gewichtung
6. Ermittlung des Gesamtscores und Rangfolge der Alternativen	Ziel ist die Einzelmaßnahmen- oder Technologiepaarbewertung, keine Rangfolge
7. Auswertung und Analyse der Bewertungsergebnisse	Fokus ist die Hemmnisanalyse und Ableitung von Lösungsstrategien
8. Sensitivitätsanalyse – Auswirkung abweichender Kriteriengewichte und Ausprägungen	Nicht relevant aufgrund fehlender Kriteriengewichtung

Abb. 6 zeigt Details zu den Kriterien und Ausprägungen des Bewertungsradars aus Abb. 1. Grundlage für die Identifikation und Clusterung der 24 Kriterien und deren Ausprägungen sind 66 Publikationen mit einem thematischen Fokus im Bereich der multikriteriellen Bewertung von THG-Verminderungsmaßnahmen [18]. Die Häufigkeit, mit der die ausgewählten Kriterien in der untersuchten Literatur erwähnt wurden, sowie einschlägige

Literatur je Kriterium können Abb. 6 entnommen werden. In Anlehnung an [13] und [15] wurde bei der Definition der Kriterien auf folgende Prinzipien geachtet:

- Hohe Abdeckung der für die Bewertung von industriellen THG-Verminderungsmaßnahmen relevanten Aspekte;
- Trennschärfe;
- Messbarkeit;
- Branchenübergreifende Relevanz.

Die Kriterien 1, 6-8, 13, 15, 18 und 24 sind als perspektivenunabhängige Ausschlusskriterien definiert [18]. Eine Maßnahme wird von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen, wenn

- irreversible Schäden an Umwelt oder Gesundheit (1, 6-8),
- ein technologischer Reifegrad kleiner acht (13),
- negative Auswirkungen auf die Zuverlässigkeit der Produktionsanlage oder die Produktqualität (15,18) oder
- die Nichteinhaltung von gesetzlich vorgeschriebenen Umweltstandards (24) auftritt.

Die Clusterung der Kriterien erfolgte in Anlehnung an [14]. Dabei wurden Kriterien hinsichtlich ihrer Kernaspekte gruppiert und den Wirkungsdimensionen Soziopolitik, Technologie, Ökologie, Ökonomie und Regulatorik zugeordnet. Durch diese Clusterung wird im Anschluss an die Bewertung deutlich, in welchen der genannten Bereichen Hemmnisse abgebaut werden müssen.

Im Anschluss an die Literaturrecherche wurden die Kriterien und Cluster mittels semi-strukturierter Fragebögen und Interviews durch Experten aus unterschiedlichen Fachbereichen der FfE validiert. Eine weitere externe Validierungsrunde steht noch aus.

Das Bewertungsradar stellt den letzten Schritt im Rahmen der holistischen Bewertung von industriellen THG-Verminderungsmaßnahmen dar (Abb. 4). Durch die Definition von Ausschlusskriterien und die Überführung der Ausprägungen je Kriterium in ein Ampelsystem ermöglicht das Radar eine praktikable Maßnahmenbewertung durch potenzielle Anwender aus Politik und Wirtschaft.

Hierdurch wird die wissenschaftliche Maßnahmenbewertung mittels statischer und dynamischer VKK um praxisrelevante Kriterien ergänzt. Zudem wird durch die abschließende Einzelmaßnahmenbewertung keine eindeutige Maßnahmenreihenfolge suggeriert.

Durch den holistischen Bewertungsablauf soll die konkrete Identifikation von Hemmnissen für die Maßnahmenumsetzung aus den unterschiedlichen Stakeholderperspektiven erleichtert werden.

Tabelle 3: Details zu den Kriterien und Ausprägungen des Bewertungsradars [18], [14]

Kürzel	Kriterium	Ausprägungen			Ausschlusskriterium?	Häufigkeit (n = 66)	Literatur (Auswahl)
SP	Soziopolitisch						
1	Arbeitnehmersgesundheit	Sinkt	Keine Auswirkungen	Steigt	Ja	18 (27 %)	[14], [24]
2	Anzahl der Arbeitsplätze	Sinkt	Keine Auswirkungen	Steigt		21 (31 %)	[25]
3	Akzeptanz von Politik und Gesellschaft	Ablehnung abgelehnt	Teilweise Ablehnung	Keine Ablehnung		23 (34 %)	[15],[14], [24]
4	Beitrag zur regionalen Entwicklung	Negativ	Kein Einfluss	Positiv		14 (21 %)	[26]
5	Weitere gesellschaftliche Auswirkungen	Offene Frage				30 (45 %)	
Öko	Ökologisch						
6	THG-Reduktionspotenzial	Potenzial < 1%	1% ≤ Potenzial < 95%	Potenzial ≥ 95%	Ja	47 (70 %)	[14]
7	Wasserqualität	Sinkt	Keine Auswirkungen	Steigt	Ja	31 (46 %)	[26]
8	Bodenqualität	Sinkt	Keine Auswirkungen	Steigt	Ja	21 (31 %)	
9	Ressourcenbedarf	Steigt	Unbeeinflusst	Sinkt		34 (51 %)	
10	Recyclingquote	Sinkt	Unbeeinflusst	Steigt		14 (21 %)	
11	Weitere ökologische Auswirkungen	Offene Frage				33 (49 %)	
T	Technologisch						
12	Systemrückwirkungen	Negativ	Kein Einfluss	Positiv		3 (4 %)	Basierend auf [5], [27]
13	Technologische Reife	1,2,3,4	5,6,7,8	9	Ja	19 (28 %)	[13]
14	Natürliche Austauschzyklen bis 2050	Keiner	1 bis 2	Min. 3		11 (16 %)	
15	Produktionssicherheit	Sinkt	Keine Auswirkungen	Steigt	Ja	16 (24 %)	[24]
16	Komplexität der technischen Umstellung	Steigt	Keine Auswirkungen	Sinkt		17 (25 %)	
17	Komplexität der Anwendung	Steigt	Keine Auswirkungen	Sinkt		7 (10 %)	
18	Produktqualität	Sinkt	Keine Auswirkungen	Steigt	Ja	11 (16 %)	Basierend auf [24], [16]
Ökon	Ökonomisch						
19	Investitionshürde	Hoch trotz Förderung	Förderung benötigt	keine Hürde		46 (54 %)	basierend auf [28]
20	Amortisationszeit	AMZ > 3 Jahre	3 Jahre ≥ AMZ > 1 Jahr	AMZ ≤ 1 Jahr		43 (64 %)	[29]
21	Interner Zinsfuß	IZF < 10%	10% ≤ IZF < 30%	IZF ≥ 30%			
22	Wirtschaftliches Potenzial	Sinkt	keine Auswirkungen	Steigt		13 (19 %)	[17]
R	Rechtlich						
23	Kompatibilität mit geltenden Gesetzen	Nein	Unsicher	Ja		8 (12 %)	[30]
24	Einhaltung von regionalen Umweltstandards	Nein	Ja		Ja	9 (13 %)	[14]

Literaturverzeichnis

- [1] Kesicki, F.: Decomposing long-run carbon abatement cost curves – robustness and uncertainty. London: University College London Energy Institute, 2012.
- [2] McKinsey & Company, Inc.: Kosten und Potenziale der Vermeidung von Treibhausgasemissionen in Deutschland. New York City: BDI initiativ – Wirtschaft für Klimaschutz, 2009.
- [3] Gebert, P. et al.: Klimapfade für Deutschland. München: The Boston Consulting Group (BCG), prognos, 2018.
- [4] Guminski, A. et al.: Energiewende in der Industrie: Methodik zur Identifikation und Quantifizierung von Dekarbonisierungsmaßnahmen. In: et Energiewirtschaftliche Tagesfragen, Ausgabe 12/2017.
- [5] Fattler, S. et al.: Dynamis Hauptbericht – Dynamische und intersektorale Maßnahmenbewertung zur kosteneffizienten Dekarbonisierung des Energiesystems. München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V., 2019.
- [6] Kleinertz, B. et al.: Coping with drawbacks of conventional CO₂ abatement curves – A case study on fossil and renewable gases. In: 11. Internationale Energiewirtschaftstagung (IEWT); Wien: TU Wien, 2019.
- [7] Kleinertz, B. et al.: CO₂-Verminderungskosten von Gasen – Projekt in Auftrag von EnBW Energie Baden-Württemberg AG. In: <https://www.ffe.de/themen-und-methoden/ressourcen-und-klimaschutz/764-co2-verminderungskosten-von-gasen-entwicklung-statischer-co2-verminderungskostenkurven>. (Abruf am 2018-07-17); (Archived by WebCite® at <http://www.webcitation.org/70yXTyspa>); München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V., 2018.
- [8] Guminski, A.; von Roon, S.: Transition Towards an “All-electric World” – Developing a Merit-Order of Electrification for the German Energy System in: 10. Internationale Energiewirtschaftstagung an der TU Wien. Wien, Österreich: Technische Universität Wien, 2017.
- [9] Lernende Energieeffizienz-Netzwerke (LEEN): München-Oberbayern, Südbayern, Vorarlberg I und II, Chiemgau-Rupertiwinkel, Bayerngas, Verbund - laufende Projekte. München: Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH, 2014.
- [10] Fattler, S.; Conrad, J. ; Regett, A. et al.: Dynamis – Dynamische und intersektorale Maßnahmenbewertung zur kosteneffizienten Dekarbonisierung des Energiesystems. München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V., Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH, Technische Universität München, 2019.
- [11] BDEW-Strompreisbestandteile Januar 2020 – Haushalte und Industrie. Berlin: BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., 2020.
- [12] Bühler, F. et al.: Evaluation of energy saving potentials, costs and uncertainties in the chemical industry in Germany. In: Applied Energy Volume 228. Philadelphia, USA: Elsevier, 2018.
- [13] Wang, J.-J.; Jing, Y.-Y.; Zhang, C.-F.; Zhao, J.-H.: Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making in: Renewable and Sustainable Energy Reviews (Ausgabe 9/2009). Amsterdam: Elsevier Ltd., 2009.
- [14] Ibáñez-Forés, V. et al.: A holistic review of applied methodologies for assessing and selecting the optimal technological alternative from a sustainability perspective. In: Journal of Cleaner Production 70 (2014) 259-281. Castellón: Universitat Jaume, 2014.
- [15] Ren, J. et al.: Sustainability Decision Support Framework for Industrial System Priorization. In: AIChE Journal Vol. 62, No. 1. New York: American Institute of Chemical Engineers, 2016.
- [16] Mokhtar, A. et al.: A decision support tool for cement industry to select energy efficiency measures. In: Energy Strategy Reviews 28 (2020). Shiraz: Shiraz University of Technology, 2020.
- [17] Weigel, M. et al.: Multicriteria analysis of primary steelmaking technologies. In: Journal of Cleaner Production 112(2016), 1064-1076. Amsterdam: Elsevier, 2016.
- [18] Kain, T.: Multikriterielle Bewertung von Maßnahmen zur Treibhausgasverminderung in der Europäischen Industrie. Masterarbeit. Herausgegeben durch Technische Universität München – Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH, betreut durch Mauch, W.; Guminski, A. München, 2020.
- [19] Guminski, G. et al.: System effects on high demand?side electrification rates: A scenario analysis for Germany in 2030. In: WIREs Energy Environ. e327. New Jersey: Wiley Online Library, 2018.
- [20] Guminski, A. et al.: Model based evaluation of industrial greenhouse gas abatement measures. Wien, Österreich: 11. Internationale Energiewirtschaftstagung an der TU Wien, 2019.
- [21] Hübner, T.: Small-Scale Modelling of Individual Greenhouse Gas Abatement Measures in Industry. Munich: Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft (FfE), 2020.
- [22] Hübner, T. et al.: Die Rolle synthetischer Brennstoffe zur Erreichung der klimapolitischen Ziele – Bedeutung im Jahr 2050. In: BWK (Brennstoff, Wärme, Kraft) – Das Energie-Fachmagazin 10/2018.
- [23] Vogt-Schilb, A. et al.: When starting with the most expensive option makes sense: Optimal timing, cost and sectoral allocation of abatement investment. In: Journal of Environmental Economics and Management 88(2018), 210-233. Amsterdam: Elsevier, 2017.
- [24] Oberschmidt, J.: Multikriterielle Bewertung von Technologien zur Bereitstellung von Strom und Wärme. Göttingen: Universität Göttingen, 2010.
- [25] Kluczek, A.: An energy-led sustainability assessment of production systems – An approach for improving energy efficiency performance. In: International Journal of Production Economics 216 (2019) 190-203. Warschau: Warsaw University of Technology, 2019.
- [26] Segura-Salazar, J. et al.: Sustainability in the Minerals Industry: Seeking a Consensus on Its Meaning. In: Sustainability 2018, 10. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2018.
- [27] Afgan, N. et al.: Sustainability assessment of hydrogen energy systems. Lisbon: Instituto Superior Tecnico, Mechanical Engineering, 2004.
- [28] Ketelaer, T. et al.: Energieeffizienzmaßnahmen in der Industrie: Bewertung von Investitionsparametern, Treibern und Hemmnissen. In: Energiewirtschaftliche Tagesfragen 12/2017; Jülich: Forschungszentrum Jülich GmbH, 2017.
- [29] Trianni, A. et al.: Industrial Sustainability: Modelling Drivers and Mechanisms with Barriers. In: Journal of Cleaner Production 168, 1482-

1504. Mailand: Politecnico di Milano, 2017.

[30] Quader, A. et al.: A Hybrid Fuzzy MCDM Approach to Identify Critical Factors and CO2 Capture Technology for Sustainable Iron and Steel Manufacturing. In: Arabian Journal for Science and Engineering 2016. Dhahran: King Fahd University of Petroleum and Minerals, 2016.

Kontakt

Andrej Guminski; Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH; E-Mail: aguminski@ffe.de

Serafin von Roon; Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH; E-Mail: sroon@ffe.de