

# Nachhaltiger Umgang mit überschüssigen Windstromanteilen

Eine multikriterielle Analyse verschiedener Netz- und Speicheroptionen

CHRISTINE KRÜGER

**Um Strom aus regenerativen Energien, der zeitweise nicht in das Stromnetz aufgenommen werden kann, nicht abregeln zu müssen, können neben dem Netzausbau auch verschiedene Speichertechnologien eingesetzt werden. Hier wird ein Vergleich dieser Optionen hinsichtlich ihrer Eignung für einen nachhaltigen Umgang mit Stromüberschüssen angestellt. Dazu werden mit einer multikriteriellen Analyse (engl. Multi-Criteria Analysis, MCA) sowohl ökonomische als auch ökologische, soziale und technologische Kriterien herangezogen. Die MCA bildet ein wertvolles Werkzeug zur Entscheidungsfindung und dokumentiert einen transparenten und nachvollziehbaren Entscheidungsprozess. Dieser Artikel beschreibt die Struktur der MCA, die zur Bewertung genutzten Kriterien und insbesondere den Gewichtungprozess, der einen wichtigen Aspekt der MCA darstellt.**

**D**ie Einspeisung von Strom aus fluktuierenden regenerativen Energiequellen stellt das Energiesystem vor neue Herausforderungen. Auf Grund von Netzengpässen müssen bereits heute zunehmend Anteile von Windenergie aberegelt werden. Um diesem Phänomen zu begegnen, können verschiedene Maßnahmen ergriffen werden. Dazu zählen neben dem Ausbau des Stromnetzes auch verschiedene Netzertüchtigungs- und Speicheroptionen. In bisherigen Abwägungen hat die ökonomische Bewertung einer Technologie meist den Ausschlag für deren Realisierung gegeben. Im Sinne einer nachhaltigen Entwicklung sind allerdings neben finanziellen Aspekten auch ökologische und soziale Faktoren

zu berücksichtigen. Vor diesem Hintergrund wird im Folgenden eine Methode vorgestellt, die es erlaubt, Lösungsoptionen unterschiedlichster Art hinsichtlich verschiedener Kriterien zu beurteilen. Die multikriterielle Analyse (MCA) ist ein wissenschaftliches Werkzeug für eine konsistente, transparente und nachvollziehbare Entscheidungsfindung. Sie erlaubt die Einbeziehung von Stakeholdern und die gründliche Dokumentation des Prozesses. Dies kann zu höherer Akzeptanz für Entscheidungen und damit ihrer Realisierungswahrscheinlichkeit beitragen.

Die MCA wird hier angewandt auf die Frage, welche Technologien zum nachhaltigen Umgang mit regenerativen Überschussstrommengen im Zeithorizont 2020 geeignet sind. Dazu wurde vom Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie eine entsprechende Studie von 2010 bis 2013 im Auftrag des Ministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MKULNV NRW) durchgeführt.

## Optionen zum Umgang mit Windstromüberschüssen

Zunächst werden Technologien identifiziert, die geeignet sind, mit zunehmenden Mengen volatiler regenerativer Einspeisung umzugehen. Im Folgenden werden nur solche Technologien betrachtet, die einen umfassenden Beitrag zum Umgang mit Stromüberschüssen bieten können (siehe Tabelle 1).

Abregelung von Wind und PV	H <sub>2</sub> Einspeisung ins Erdgasnetz
HGÜ Freileitung	H <sub>2</sub> Speicherung in Kavernen
HGÜ Kabel	Redox-Flow-Batterien
380 kV AC Freileitung	NaS-Batterien
380 kV AC Kabel	Druckluftspeicher (status)
Freileitungsmonitoring	Druckluftspeicher adiabat
Hochtemperatur-Freileitungsseile	Pumpspeicher (status)
	Neue Pumpspeicherkonzepte

Tabelle 1: Untersuchte Alternativen zum Umgang mit Windstromüberschüssen

Da die Technologien sich zum Teil grundsätzlich in ihren Eigenschaften und Wirkungen voneinander unterscheiden, wird für Ihren Vergleich gezielt eine Methode angewandt, die diesen unterschiedlichen Charakteristika Rechnung trägt.

### Methode – die multikriterielle Analyse

Die multikriterielle Analyse (MCA) ist eine Methode zur Vorbereitung politischer Entscheidungsprozesse in hochkomplexen Themenfeldern. Ziel ist es, bei Beibehaltung der strukturellen Unterschiede möglicher Alternativen eine transparente und nachvollziehbare Entscheidungsfindung zu unterstützen. Sie erlaubt dabei, sowohl quantitative als auch qualitative Kriterien einzubeziehen. Abbildung 1 zeigt das strukturelle Vorgehen zur Durchführung einer MCA.

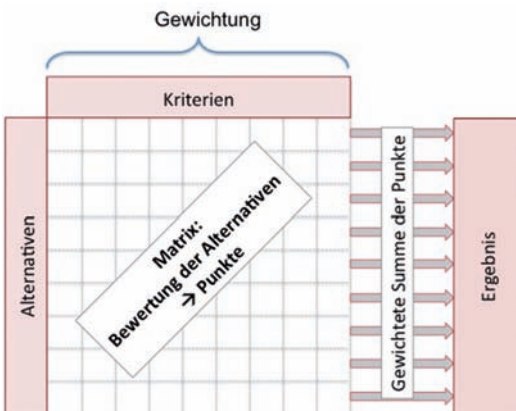


Abbildung 1: Struktur der multikriteriellen Analyse

Im ersten Schritt werden Alternativen definiert, die zur Lösung der Problemstellung geeignet scheinen und detailliert bewertet werden sollen (siehe Abschnitt 2). Zum Vergleich der gewählten Alternativen werden Kriterien identifiziert (Abschnitt 4.1). Aus der Bewertung der Kriterien für alle Alternativen ergibt sich eine Matrix (Abschnitt 4.2). Im nächsten Schritt werden die Kriterien entsprechend ihrer Relevanz gewichtet (Abschnitt 4.3). Aus der gewichteten Summe der Kriterienbewertungen schließlich ergibt sich für jede alternative Lösungsoption eine Punktzahl, die die Eignung der Alternativen hinsichtlich der Lösung der Problemstellungen widerspiegelt (Abschnitt 5).

### Durchführung der multikriteriellen Analyse zum nachhaltigen Umgang mit Windstromüberschüssen

#### Kriterien zur Beurteilung der Nachhaltigkeit verschiedener Lösungsoptionen

Damit die Ergebnisse der MCA aussagekräftig sind, müssen die Kriterien, anhand derer die Alternativen beurteilt werden, bestimmten Ansprüchen gerecht werden (in Anlehnung an: J. J. Wang et al., Review on multi-criteria Decision analysis aid in sustainable Energy-Decision Making, erschienen in Renewable and sustainable Energy Reviews, Ausgabe 9, 2009, S. 2205-2750)

- Die Kriterien müssen die für die Entscheidungsfindung relevanten Charakteristika der Alternativen abfragen
- Die Indikatoren, anhand derer die Kriterien

beurteilt werden, sollen repräsentativ für die Kriterien sein

- Redundanzen bzw. inhaltliche Überschneidungen innerhalb der Kriterien müssen vermieden werden
- Die Kriterien müssen klar und eindeutig kategorisiert werden

Wenn es Redundanzen innerhalb der Kriterien gibt, also ein Aspekt, den ein Kriterium abfragt, in mehrere Kriterien einfließt, wird diesem Aspekt eine höhere Gewichtung zuteil, dadurch kann das Ergebnis verzerrt werden. Mithilfe dieser Vorgaben wurden in einem mehrstufigen Prozess die in Abbildung 2 dargestellten Kriterien definiert.

Die Kriterien wurden in die Kategorien „Technologie“, „Politik & Soziales“, „Ökologie“ und „Ökonomie“ unterteilt. Diese Einteilung orientiert sich an den drei Säulen der Nachhaltigkeit, ergänzt um technologische Aspekte, die zur Beurteilung der Alternativen relevant sind.

Ausgangspunkt dieser Kriterienliste war eine eigene Sammlung von Fragestellungen, die für die Beurteilung von Alternativen zur Integration hoher

Anteile volatiler Einspeisung relevant sein können. Implikationen dieser Fragestellungen wurden identifiziert und entsprechende Indikatoren zugeordnet. Anschließend wurden Redundanzen innerhalb der Indikatoren untersucht und entfernt und die Relevanz der Kriterien für die Fragestellung erneut geprüft. So wurde beispielsweise das Kriterium „Akzeptanz“ in die gesellschaftliche und die Anwohnerakzeptanz aufgeschlüsselt. Letztere wiederum wird durch verschiedene Faktoren wie Auswirkungen auf das Landschaftsbild, lokale Emissionen oder den Flächenverbrauch beeinflusst, die bereits an anderer Stelle abgefragt werden. Somit wird zur Vermeidung von Redundanzen die Anwohnerakzeptanz nicht als eigenes Kriterium aufgenommen. Statt dem Überbegriff „Akzeptanz“ werden also nur noch bestimmte, noch nicht anderweitig abgefragte Faktoren für die gesellschaftliche Akzeptanz in der Analyse betrachtet. Wie dieses Beispiel zeigt, muss jedes dieser Kriterien sorgfältig definiert werden, um eindeutig bewertet werden zu können.

### Bewertung der alternativen Optionen hinsichtlich der Kriterien

Der Kern der MCA ist die Bewertung der alternativen Lösungsoptionen hinsichtlich der zuvor defi-

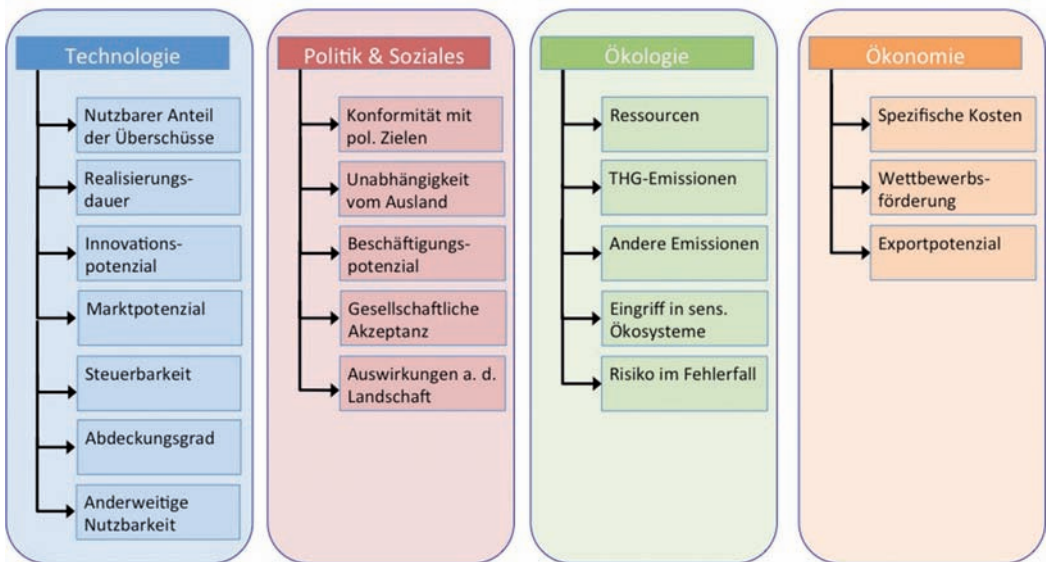


Abbildung 2: Kriterien zur Beurteilung von Alternativen zum nachhaltigen Umgang mit regenerativen Stromüberschüssen

nierten Kriterien. Dazu werden Literaturrecherchen und Expertenbefragungen genutzt, eigene Berechnungen durchgeführt und, wo notwendig, eigene Annahmen getroffen. Die Methode der MCA zielt auf größtmögliche Nachvollziehbarkeit und Transparenz. Deswegen muss jede der Bewertungen nachvollziehbar dokumentiert werden. Um sowohl quantitative als auch qualitative Kriterien gleichermaßen bewerten zu können, wird für jedes Kriterium eine Skala von 0 bis 10 definiert. Damit die Unterschiede zwischen den Alternativen so deutlich wie möglich erfasst werden, wird diese Skala relativ besetzt: Die Alternative, die hinsichtlich eines Kriteriums am besten bzw. am schlechtesten beurteilt wird, erhält 10 bzw. 0 Punkte. Die dazwischen liegenden Bewertungen erfolgen linear.

In der hier vorgestellten Untersuchung werden 15 Alternativen in jeweils 20 Kriterien bewertet, wobei einige wiederum in Unterkriterien gegliedert sind. Die Dokumentation dieser Bewertungen ist wegen des großen Umfangs im Rahmen dieses Artikels nicht möglich und kann bei Interesse im Projektbericht nachvollzogen werden (Wuppertal Institut im Auftrag des MKULNV NRW, Nachhaltiger Umgang mit überschüssigen Windstromanteilen, erscheint voraussichtlich im Mai 2013).

**Gewichtung der Kriterien mit dem Analytical Hierarchy Process**

Die Auswahl des Gewichtungsverfahrens hat großen Einfluss auf die Aussagekraft und Belastbarkeit der Ergebnisse der MCA. In dieser Untersu-

chung wird der Analytical Hierarchy Process (AHP) genutzt. Dieser bietet den Vorteil, dass, bei vertretbarem Aufwand, die Gewichtung der Kriterien zu jedem Zeitpunkt nachvollziehbar bleibt, gut dokumentierbar ist und Widersprüche der Gewichtungen leicht festgestellt und behoben werden können. Die Rolle des Entscheidungsträgers in diesem Prozess besteht darin, paarweise eine dezidierte Einschätzung der Relevanz der Kategorien bzw. Kriterien durchzuführen. Dies bedeutet eine gründliche Auseinandersetzung mit den eigenen Einschätzungen der Prioritäten.

Im Folgenden wird das Vorgehen des AHP (in Anlehnung an Saaty et al., The Analytical Hierarchy and Analytic Network Measurement Process: The measurement of intangibles, in Handbook of Multicriteria Analysis, Berlin/Heidelberg 2010) beschrieben. Die Kriterien müssen hierarchisch kategorisiert sein. Nun werden zunächst die Kategorien untereinander verglichen: Der Entscheidungsträger soll dafür die Frage „Wie viel wichtiger ist Kategorie I als Kategorie II?“ auf einer Skala von 1/9 (extrem viel, weniger wichtig) über 1 (gleich wichtig) bis 9 (extrem viel wichtiger) beantworten. Anschließend wird das Verhältnis von Kategorie I zu III, von II zu III und so weiter abgefragt, bis alle Kategorien zueinander in Relation gesetzt sind. Daraus resultiert eine Matrix der Relevanzen.

Tabelle 2 zeigt beispielhaft die paarweisen Bewertungen der Kategorien Technologie, Politik & Sozi-

„Wie relevant ist / sind ...	im Verhältnis zu ...?“	Unwichtiger ...				gleich	... Wichtiger			
		1/9	1/7	1/5	1/3	1	3	5	7	9
Technologie	Politik & Soz.							x		
Technologie	Ökologie					x				
Technologie	Ökonomie					x				
Politik & Soz.	Ökologie				x					
Politik & Soz.	Ökonomie				x					
Ökologie	Ökonomie					x				

Tabelle 2: Paarweise Bewertungen der Kriterien-Kategorien

	Technologie	Politik & Soz.	Ökologie	Ökonomie	Gewichtungsvektor
Technologie	1	5	1	1	33%
Politik & Soziales	1/5	1	1/3	1/3	9%
Ökologie	1	3	1	1	29%
Ökonomie	1	3	1	1	29%

Tabelle 3: Bewertungsmatrix und Gewichtungsvektor der Kriterien-Kategorien

ales, Ökologie und Ökonomie. Abweichend vom festgelegten Prozess der MCA wurden die Bewertungen hier durch den Bearbeiter in Abstimmung mit dem Auftraggeber vorgenommen. Diese Matrix bildet die Basis für die Verteilung der Gewichtun-

gen: Zunächst werden die Eigenwerte dieser Matrix bestimmt. Aufgrund der Struktur der Matrix gibt es stets nur einen reellen Eigenwert. Die Gewichtung ergibt sich aus dem Eigenvektor zu diesem Eigenwert, der auf die Länge „1“ normiert wird.

Im Beispiel resultiert die in Tabelle 3 links gezeigte Gewichtungsmatrix, aus der sich der in der Tabelle rechts angegebene Gewichtungsvektor berechnen lässt.

Wenn die Gewichtung der Kategorien fertig gestellt ist, werden die Kriterien innerhalb jeder Kategorie analog gegeneinander bewertet und daraus die Gewichtung der Kriterien innerhalb der Kategorie bestimmt. Daraus ergibt sich eine mehrstufige Gewichtung aller Kriterien. Daraus resultieren schließlich die in Tabelle 4 dargestellten Gewichtungen.

Kategorie	Gewichtung Kategorie	Kriterium	Gewichtung Kriterium (%)	Gewichtung gesamt (%)
Technologie	33 %	Nutzbarer Anteil	22	7
		Realisierungsdauer	5	5
		Innovationspotenzial	12	12
		Marktpotenzial	29	29
		Steuerbarkeit	3	3
		Abdeckungsgrad	21	21
		anderw. Nutzbarkeit	8	8
Politik & Soziales	9 %	Konf. mit pol. Zielen	4	0
		Unabh. vom Ausland	17	2
		Beschäftigungspotenzial	52	5
		gesellschaftl. Akzeptanz	20	2
		Landschaftsbild	8	8
Ökologie	29 %	Ressourcen	16	5
		THG-Emissionen	56	16
		Weitere Emissionen	4	1
		Sensible Ökosysteme	18	5
		Risiko im Fehlerfall	7	2
Ökonomie	29 %	Spezifische Kosten	74	21
		Wettbewerbsförderung	9	9
		Exportpotenzial	17	17

Tabelle 4: Gewichtung der Kriterien in der MCA

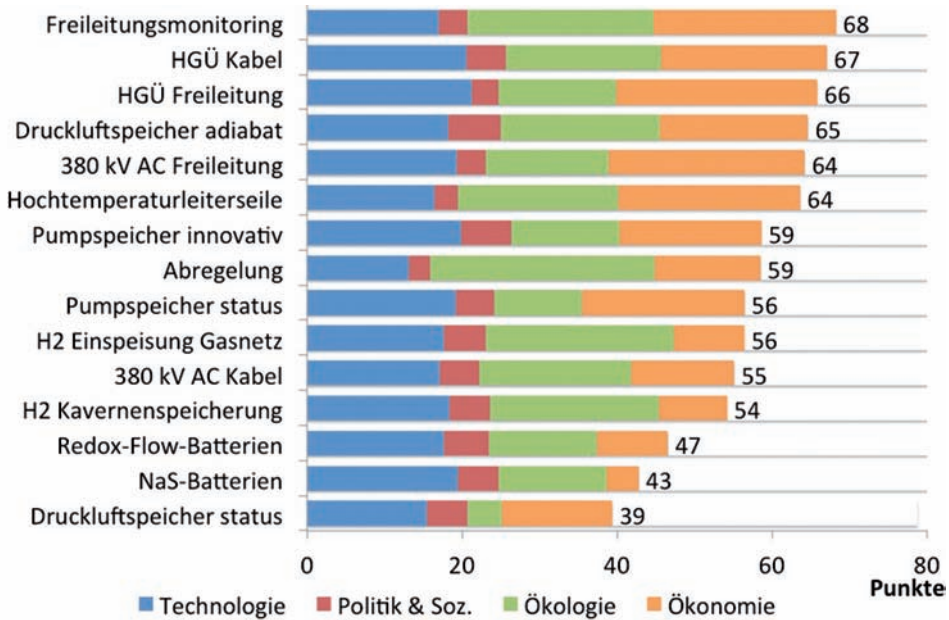


Abbildung 3: Ergebnis der MCA zum nachhaltigen Umgang mit Windstromüberschüssen

### Varianten der Gewichtung

Die Einschätzung der Relevanz der Kriterien ist stets eine temporäre und kann sich im Laufe der Zeit ändern. Die meisten Lösungsoptionen haben eine lange Lebensdauer und erfordern hohe Investitionen. Deswegen sollte eine Entscheidung robust gegenüber sich ändernden Prioritäten sein. Um diese Stabilität zu prüfen, werden zusätzlich zu der oben beschriebenen Gewichtung weitere Gewichtungsvarianten bestimmt, darunter eine stark ökologische und eine stark ökonomische, bei denen die Kategorien Ökologie bzw. Ökonomie jeweils mit 62,5 % und die verbleibenden Kategorien jeweils mit 12,5 % gewichtet werden.

### Ergebnisse der multikriteriellen Analyse

Zur Auswertung der MCA werden die Punktzahlen, die die Alternativen in den verschiedenen Kriterien erhalten haben, mit der Gewichtung des jeweiligen Kriteriums multipliziert. Das Resultat

wird durch eine Multiplikation mit dem Faktor zehn auf eine mögliche Gesamtpunktzahl von 100 Punkten skaliert.

Abbildung 3 zeigt das Ergebnis einer dieser Berechnungen. Die Alternativen zum Umgang mit Windstromüberschüssen sind hier nach der Punktzahl, die sie erreichen, geordnet. Es zeigt sich, dass die alternativen Lösungsoptionen zum Umgang mit regenerativen Energieüberschüssen in drei Gruppen eingeteilt werden können: Am besten geeignet sind die betrachteten Netztechnologien, abgesehen von den 380 kV Wechselspannungskabeln, und adiabate Druckluftspeicher. Insbesondere das Freileitungsmonitoring erweist sich als gute Option. Die zweite Gruppe setzt sich zusammen aus Pumpspeichern, den Varianten der Wasserstoffspeicherung und den zuvor erwähnten Kabeln, die jeweils in etwa so viele Punkte erhalten wie die Abregelung und deswegen ihr gegenüber nicht zu bevorzugen sind. Die Batterien und konventionelle Pumpspeicher hingegen erreichen deutlich geringere Punktzahlen und werden nicht als geeignete Lösungsoptionen eingeschätzt.

In einem zweiten Auswertungsschritt werden die in Abschnitt 4.3.1 beschriebenen Gewichtungsvarianten angewendet und überprüft, welche Auswirkungen geänderte Gewichtungen auf die Position der Alternativen im Ranking haben. Dabei stellt sich heraus, dass das Freileitungsmonitoring und die HGÜ-Kabel sowie adiabate Druckluftspeicher auch unter verschiedenen Priorisierungen stets gute Ergebnisse erzielen, ihre Bewertung ist also robust gegenüber Gewichtsänderungen. Die Freileitungstechnologien hingegen werden deutlich schlechter bewertet, wenn hohe ökologische Maßstäbe angelegt werden. Deswegen ist ihre Anwendung sorgfältig zu prüfen.

Die Anwendung der MCA auf die Frage, welche Technologien zum nachhaltigen Umgang mit Windstromüberschüssen im Zeithorizont 2020 ein-

gesetzt werden können, führt also hier zu dem Ergebnis, dass insbesondere Freileitungsmonitoring, HGÜ-Kabel und adiabate Druckluftspeicher geeignete Optionen sind.



*Christine Krüger, Wuppertal Instituts für Klima, Umwelt, Energie.*

*Kontakt: [christine.krueger@wupperinst.org](mailto:christine.krueger@wupperinst.org)*

*Co-Autoren: Frank Merten und Arjuna Nebel (Wuppertal Instituts für Klima, Umwelt, Energie)*