



**Energiestrategie 2050:
Umweltanalyse und Bewertung von Technologien
zur Stromerzeugung**

3. Februar 2013

IMPRESSUM

- Auftraggeber** Bundesamt für Umwelt (BAFU), Abteilung Boden, Sektion UVP und Raumordnung, CH-3003 Bern
- Auftragnehmer** Ecosens AG, CH-8304 Wallisellen
INFRAS AG, CH-8045 Zürich
- Leadautor** Bernhard Oettli, INFRAS
- Autoren** Cuno Bieler, INFRAS
Judith Reutimann, INFRAS
Christoph Erdin, Ecosens
- Begleitgruppe** Nikolaus Hilty, Projektleitung, Sektion UVP und Raumordnung, BAFU
Claire-Lise Suter, Abteilung Wald, BAFU
Josef Rohrer, Sektion UVP und Raumordnung, BAFU
Christoph Wenger, Abteilung Boden, BAFU
Silvia Ruprecht-Martignoli, Abteilung Ökonomie und Umweltbeobachtung, BAFU
Nina Gammenthaler, Abteilung Recht, BAFU
Marc Baumgartner, Abteilung Wasser, BAFU
Reto Burkard, Abteilung Klima, BAFU
Andreas Stalder, Abteilung Arten, Ökosysteme, Landschaften, BAFU
Thomas Roth, SECO
Bruno Guggisberg, BFE
Klaus Riva, BFE
Matthias Gysler, BFE
- Hinweis** Diese Studie wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) verfasst. Für den Inhalt sind die Auftragnehmer verantwortlich.

INHALTSVERZEICHNIS

IMPRESSUM	I
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	IV
ZUSAMMENFASSUNG	V
1 EINLEITUNG	1
1.1 Ausgangslage und Auftrag	1
1.2 Vorgehen und Rahmenbedingungen	1
2 GRUNDLAGEN	3
2.1 Begriffe, Abgrenzung Technologien	3
2.2 Umweltkriterien	4
3 VORGEHEN UND METHODIK	6
3.1 Vorgehen	6
3.2 Arbeitsschritte	6
3.3 Methodik für Wirkungsanalyse	7
4 GRUNDSÄTZE ZUR ANALYSE DER UMWELTWIRKUNGEN	11
5 ERGEBNISSE DER UMWELTANALYSE	15
5.1 Darstellung der einzelnen Technologien aus Umweltsicht	15
5.2 Zusammenfassende Beurteilung der Technologien aus Umweltsicht	20
5.3 Quervergleich anhand von verfügbaren Ökobilanzen	27
6 ZUSATZKRITERIEN FÜR DIE GESAMTBEURTEILUNG DER TECHNOLOGIEN	30
6.1 Funktion und Bedeutung einer Technologie	30
6.2 Kennlinie der Umweltwirkung einer Technologie	31
6.2.1 Restpotenziale für die Stromerzeugung	31
6.2.2 Ökologische Verträglichkeit und Umweltkennlinie einer Technologie	32
7 FOLGERUNGEN UND EMPFEHLUNGEN	35
7.1 Ansatz zur Bildung des optimalen Technologieportfolios	35
7.2 Strategische Folgerungen für den Ausbau der erneuerbaren Energien	37
7.3 Technologiespezifische Folgerungen und Empfehlungen	37
ANHANG	41
ANHANG A: UMWELTKRITERIEN GEMÄSS URSPRÜNGLICHEM PFLICHTENHEFT BAFU	42
ANHANG B: LISTE DER INTERVIEWTEN EXPERTEN	44

ANHANG C: ÜBERSICHT ERGEBNISSE WIRKUNGSANALYSE	45
ANHANG D: LITERATUR	46
ANHANG E: BEURTEILUNGSBLÄTTER	47
Wasserkraft	48
Windkraft	61
Sonnenenergie	70
Biomasse (ohne Holz)	80
Biomasse – Holzenergie	87
Geothermie	91
Strom und Wärme aus Kehrlichtverbrennungsanlagen (KVA)	97
Fossile Strom- und Wärmeproduktion mit WKK- und GuD-Anlagen	103
Elektrizitätsnetz	108
Gasnetz	114

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

Abkürzung	Beschreibung
BAFU	Bundesamt für Umwelt
BFE	Bundesamt für Energie
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
dB	Dezibel
ERN	Erneuerbare Energien
G	Starke Umweltwirkung
Gg	Gigagramm (1 Gg = 1'000 Tonnen)
GuD	Gas- und-Dampf-Kombikraftwerk
KEV	Kostendeckende Einspeisevergütung
l	Liter
NH ₃	Ammoniak
NIS	Nicht ionisierende Strahlung
NO _x	Stickstoffoxide
PJ	Petajoule
POL-BAFU	Projektoberleitung des Bundesamtes für Umwelt
PV	Photovoltaik
SECO	Staatssekretariat für Wirtschaft
SO ₂	Schwefeldioxid
THG	Treibhausgase
U1–U5	Umweltkriterien
UVEK	Eidg. Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation
WKK	Wärme-Kraft-Koppelung

ZUSAMMENFASSUNG

Einleitung, Zielsetzung	<p>Im Rahmen der „Interdepartementalen Arbeitsgruppe Energie“ wurde das BAFU beauftragt, die Massnahmen der neuen Energiestrategie aus Umweltsicht zu analysieren. Zusätzlich zur Umweltanalyse der Massnahmen sollen ausgewählte Technologien zur Erzeugung von Strom aus erneuerbarer Energie sowie aus fossilen Brennstoffen betrachtet und beurteilt werden. Damit sollen fundierte Grundlagen für die Beurteilung und Wahl der erneuerbaren Energien aus Sicht der Umwelt geliefert werden.</p>
Technologien, Fokus	<p>Ziel der vorliegenden Studie ist die Erarbeitung einer systematischen Übersicht zu den Umweltauswirkungen der verschiedenen Technologien zur Erzeugung von Strom auf der Basis erneuerbarer Energien (Wasserkraft, Windkraft, Solarenergie, Biomasse, Geothermie, Kehrlichtverbrennungsanlagen (KVA)). Im Sinne einer vollständigen Gesamtübersicht werden ergänzend auch die im Rahmen der Energiestrategie 2050 relevanten Produktionstechnologien mit fossilen Brennstoffen, namentlich fossile Wärmekraftkopplungs-(WKK-)Anlagen und Gas-und-Dampf-Kombikraftwerke (GuD-Anlagen) sowie die Umweltauswirkungen der Netze (Elektrizität und Gas) untersucht. Der Fokus liegt auf den Stromerzeugungsanlagen. Da jedoch eine Reihe von Energieerzeugungsanlagen auf der Basis erneuerbarer Energien (z.B. Holzheizkraftwerk, Geothermieanlage, KVA) auch Wärme produziert und sich die Wirkungen der Strom- und Wärmeerzeugung aus Umweltsicht nicht ohne weiteres den entsprechenden Anlagenteilen zuordnen lassen, wurden bei diesen Anlagen die Umweltwirkungen der gesamten Energieerzeugung beurteilt.</p> <p>Die Umweltwirkungen der ausgewählten neun Technologietypen (z.B. Wasserkraft) mit 21 Varianten (z.B. Lauf- oder Speicherkraftwerke) wurden primär anhand von vier Hauptumweltkriterien mit neun Unterkriterien gemäss Vorgabe des BAFU bewertet. Auf das Kriterium „nachhaltige Ressourcennutzung und Ressourceneffizienz“ wurde in Absprache mit der Begleitgruppe verzichtet.</p>
Zentrale Annahmen, Referenz	<p>Im Hinblick auf die Umweltauswirkungen der Technologien gehen wir in Absprache mit dem BAFU von folgenden Annahmen aus:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Betrachtung einzelner Technologien: Die Analyse und Beurteilung der Umweltwirkungen bezieht sich auf die jeweilige Betrachtung einer einzelnen Technologie. Dabei wird angenommen, dass die betrachtete Technologievariante von den anderen unabhängig ist bzw. dass die Umweltwirkungen der anderen Technologien die Umweltwirkungen der jeweils analysierten Technologie nicht beeinflussen. Ein Vergleich von Technologietypen findet, wo sinnvoll, erst im Rahmen der übergeordneten Folgerungen statt (vergl. Arbeitsschritt 4, Ergebnisse in den Kapiteln 5 und 7). • Anlagestandorte in der Schweiz: Die vorliegende Umweltanalyse beschränkt sich auf Anlagen mit Standort in der Schweiz. • Referenz für die Beurteilungen der Umweltwirkungen ist der Status Quo, d.h. der IST-Zustand der Energieversorgung. Die Umweltwirkungen der

betrachteten Technologien werden im Vergleich zu einer „grünen Wiese“ beurteilt. Die Beurteilung geht also z.B. davon aus, dass Gebäude, Werkhöfe und weitere Teile von Energieerzeugungsanlagen auf bisher nicht genutzten Flächen gebaut werden, nicht z.B. in bisher anders genutzten Industriezonen. *Damit hat praktisch jede Investition in Energiesysteme, auch auf der Basis erneuerbarer Energien, negative Umweltwirkungen.*

Die Beurteilung differenziert zwischen Strom und Wärme wie folgt:

Strom: Aufgrund der gewählten IST-Referenz und des heute nahezu CO₂-freien Stromproduktionsmix der Schweizer Stromerzeugungsanlagen werden in dieser Studie *keine Potenziale für die Reduktion von Treibhausgasemissionen* dank dem Ausbau von Stromerzeugungsanlagen auf der Basis erneuerbarer Energien geltend gemacht.

Wärme: Ausgehend vom Status Quo berücksichtigt die Analyse der Umweltwirkungen in der Betriebsphase den heutigen Wärmebedarf (für die Heizung von Gebäuden) in der Umgebung einer neuen Energieerzeugungsanlage, die nebst Elektrizität auch Wärme generiert (z.B. Holzheizkraftwerk, KVA, Geothermieanlage) und geht davon aus, dass diese Wärme heute auf fossiler Basis generiert wird. *Damit wird jeder Wärmeerzeugungsanlage auf der Basis erneuerbarer Energien (Beispiele oben) ein Potenzial zur Reduktion von Treibhausgasemissionen sowie des Verbrauchs fossiler Energieträger attestiert.*

Wirkungsanalyse

Herzstück der Umweltanalyse bildet die Wirkungsanalyse. Zu Darstellung der Umweltwirkungen der Technologien wird eine fünfstufige Skala mit einem Farbcode verwendet: dunkelgrün steht für eine stark positive Wirkung, hellgrün für eine schwach positive, ein blasses Rot für eine schwach negative, ein intensives Rot für eine stark negative Wirkung. Ein weisses Feld bedeutet, dass die Wirkung als vernachlässigbar beurteilt wird.

Wo möglich sind die Umweltwirkungen innerhalb eines Umweltkriteriums quantifiziert. Die Wirkung z.B. bei den Treibhausgas- oder Schadstoff-Emissionen wird pro erzeugte kWh ausgewiesen. Damit sind die dargestellten Wirkungen innerhalb einer Spalte bis zu einem gewissen Grad vergleichbar. Für die Mehrheit der Umweltkriterien (z.B. Biodiversität, Landschaftliche Vielfalt oder Naturgefahren) liegen jedoch keine direkt vergleichbaren quantifizierten Daten vor. Dort sind die Umweltwirkungen qualitativ beurteilt, die einzelnen Technologien können damit nur beschränkt miteinander verglichen werden. Innerhalb einer Zeile sind die Umweltwirkungen nach Umweltkriterien ohnehin nicht direkt vergleichbar. Die roten Felder einer bestimmten Technologie dürfen also keineswegs einfach zusammengezählt werden, um eine „Gesamtumweltwirkung“ zu ermitteln. Tabelle 1 zeigt das Ergebnis in vereinfachter Darstellung.

Tabelle 1 Wirkungsmatrix: Übersicht der Ergebnisse der Analyse der Umweltwirkungen (Aus Gründen der Übersichtlichkeit bzw. besseren Lesbarkeit sind in dieser Darstellung die Lebenszyklusphasen nicht eingezeichnet. Eine detailliertere Darstellung der Umweltwirkungen nach Lebenszyklusphasen findet sich in Anhang C.)

Ergebnis der Wirkungsanalyse			Naturräume, Artenvielfalt			Klima	Schadstoffe, Lärm, NIS			Risiken		
			Biodiversität	Landschaftliche Vielfalt	Flächennutzung	Treibhausgase/fossile Energie	Schadstoffe	Lärm	Nicht-ionisierende Strahlung	Naturgefahren	Störfall	
Technologietyp	Technologievariante											
Anlagen zur Energieerzeugung												
Erneuerbare Energien	Wasserkraft	Kleinwasserkraft	■	■	■							
		Laufkraftwerke										■
		Speicherkraftwerke	■	■	■							■
		Pumpspeicherkraftwerke										■
	Windkraft	Kleinanlagen < 250 KW _{el}	■	■	■							
		Grossanlagen > 250 KW _{el}	■	■	■							
		Windparks (>3 Anlagen)										
	Solarenergie	Solarthermische Produktion										
		Photovoltaik gebäudebezogen										
		Photovoltaik, Freiflächen-Anlagen										
	Biomasse	Industrielle/gewerbliche Vergärungsanlagen				■	■					
		Landwirtschaftliche Biogasanlagen										■
		Holz-Heizkraftwerk	■									
	Geothermie	Geotherm. Syst. zur Nutzung tiefer Aquifere				■	■					
Stimulierte geothermische Systeme (EGS)											■	
Kehrichtverbrennung	KVA				■	■						
Fossile Energien	Fossile E'Systeme	Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen (WKK)				■	■					
		GuD-Anlagen (Stromgeführt)				■	■					
Netze												
Elektrizitätsnetz	Freileitungen		■	■								
	Kabel											
Gasnetz	Gas-Netz										■	

Legende: dunkelrot = stark negative Wirkung, blasses rot = schwach negative Wirkung, weiss = vernachlässigbare Wirkung, hellgrün = schwach positive Wirkung, dunkelgrün = stark positive Wirkung

Bemerkungen:

- Die Beurteilung der Wasserkraftanlagen betrifft Neuanlagen an Fliessgewässern
- Die KVA schneidet deshalb positiv ab, weil im Rahmen dieser Umweltanalyse für die KVA nur die aufgrund der Energienutzung (Strom- und Wärmenutzung) entstehenden zusätzlichen Umweltwirkungen im Vergleich zu den Umweltwirkungen einer hypothetischen KVA ohne Wärmenutzung und Stromproduktion/-nutzung (Referenz) beurteilt werden.

Beurteilung der Technologien aus Umweltsicht:
Wasserkraft

Die Wasserkraft zeichnet sich dadurch aus, dass sie die Umwelt vorwiegend in Bezug auf Naturräume/Artenvielfalt belastet. Sie beinhaltet hingegen kaum negative Auswirkungen bzgl. Schadstoffen, Lärm oder NIS.

Neue Wasserkraftwerke an Fliessgewässern haben in der Regel stark negative Auswirkungen auf die Biodiversität und die landschaftliche Vielfalt. Die Umweltverträglichkeit hängt jedoch massgebend vom gewählten Standort, dem Anlagekonzept und den Massnahmen zur Reduktion der negativen Wirkungen ab. Durch die Optimierung bestehender Anlagen in Kombination mit der ökologischen und landschaftlichen Sanierung besteht die Möglichkeit, sowohl die Energieproduktion zu steigern wie auch die Beeinträchtigung von Landschaft und Biodiversität zu verringern.

Die Reduktion des Hochwasserrisikos durch Bauwerke, die den Wasserablauf regulieren können, hat ein reduziertes Risiko von Naturgefahren zur Folge. Mittlere und grosse Wasserkraftwerke sind damit die einzigen der analysierten

Technologien, die sich durch ein Potenzial zur Reduktion der Risiken auszeichnen.

Windkraft

Windkraftanlagen haben in vielen Fällen stark negative Auswirkungen auf die landschaftliche Vielfalt. Diese sind bei Grossanlagen und Windparks proportional (d.h. pro erzeugte kWh) zwar geringer als bei Kleinanlagen, aber dennoch gross. Zudem haben Windkraftanlagen je nach Standort schwache bis starke negative Auswirkungen auf die Biodiversität sowie in Bezug auf Lärm; im Durchschnitt werden sie als schwach negativ eingeschätzt (vgl. Tabelle 1). In erster Grössenordnung werden grosse und kleine Windkraftanlagen sowie Windparks (> 3 Anlagen am selben Standort) hinsichtlich ihrer Umweltwirkungen als etwa gleich beurteilt.

Solarenergie

Freiflächen-Photovoltaikanlagen weisen im Normalfall eine stark negative Auswirkung infolge der gegenüber gebäudebezogenen Photovoltaikanlagen erhöhten Beeinträchtigung der landschaftlichen Vielfalt und Flächennutzung aus. Zusätzlich haben sie schwach negative Auswirkungen auf die Biodiversität, namentlich indirekt in Konkurrenz zu anderen Flächennutzungen. Solarthermische und gebäudebezogenen Photovoltaikanlagen schneiden aus Umweltsicht deutlich besser ab. Sie haben keine oder nur schwach negative Umweltwirkungen, sofern dem Ortsbild- und Denkmalschutz Rechnung getragen wird. Zusätzlich belasten Treibhausgas- (THG) und Schadstoffemissionen der Photovoltaikanlagen während den Phasen Herstellung, Realisierung und Stilllegung/Entsorgung die Umwelt.

Biomasse

Das auffälligste Merkmal aller Biogasanlagen sowie der Holzheizkraftwerke sind die positiven Umweltwirkungen in Bezug auf die THG-Emissionen und den Verbrauch fossiler Brennstoffe (Reduktion der Emissionen bzw. des Verbrauchs). Dies rührt daher, dass wir bei Energieerzeugungsanlagen, die nebst Elektrizität auch Wärme generieren (z.B. Biogasanlage, Holzheizkraftwerk, Geothermieanlage), mit dem Status Quo als Referenz den heutigen Wärmebedarf (für die Heizung von Gebäuden) in der Umgebung einer neuen Energieerzeugungsanlage berücksichtigen. Dabei gehen wir davon aus, dass diese Wärme heute auf fossiler Basis generiert wird. *Damit wird jeder Wärmerzeugungsanlage auf der Basis erneuerbarer Energien, insbesondere auch den Biomasseanlagen, ein Potenzial zur Reduktion von Treibhausgasemissionen sowie des Verbrauchs fossiler Energieträger attestiert.* Landwirtschaftliche sowie industriell/gewerbliche Biogasanlagen haben im Vergleich zu anderen Energieerzeugungsanlagen auf der Basis erneuerbarer Energie sehr hohe Schadstoffemissionen. Die Holzheizkraftwerke haben als einzige der betrachteten Technologien positive Umweltwirkungen in Bezug auf die Biodiversität. Durch die Bewirtschaftung der Wälder zwecks effizienter Energieholznutzung werden seltene Habitats gepflegt und lichtere Wälder geschaffen, was sich in der Regel positiv auf die biologische Vielfalt auswirkt. Aufgrund der heute sehr strengen Luftreinhaltevorschriften (de facto Filterpflicht, Rauchgasreinigungsanlagen) liegen die Schadstoffemissionen deutlich tiefer als die der Biogasanlagen und werden gesamthaft als vernachlässigbar beurteilt.

Geothermie

Geothermieanlagen haben schwach positive und schwach negative Umweltwirkungen. Wie die anderen Wärmeerzeugungsanlagen auf der Basis erneuerba-

rer Energien zeichnen sie sich durch positive Umweltwirkungen in Bezug auf die THG-Emissionen und den Verbrauch fossiler Brennstoffe aus (Erläuterung siehe unter Biomasseanlagen). Da Geothermieanlagen im Betrieb keine Verbrennungsprozesse beinhalten wirkt sich die potenzielle Reduktion des Verbrauchs fossiler Brennstoffe auch positiv auf die Luftschadstoffemissionen aus. Für stimulierte geothermische Systeme besteht ein Risiko von Erschütterungen und Beben bei Stimulation des Untergrundes in der Realisierungs-/Bauphase. Das Risiko für Naturgefahren ist allerdings stark standortabhängig und liegt unterhalb der Schwelle für schwere gesellschaftliche Schäden. Es wird daher nur als schwach negativ beurteilt.

KVA

Die Kehrichtverbrennungsanlagen (KVA) haben, falls sie methodisch so wie im Rahmen dieses Projekts behandelt werden, als einzige Technologie überhaupt keine negativen, sondern nur positive Umweltauswirkungen. Die KVA bilden im Rahmen dieses Projekts einen Sonderfall. Erstens haben sie in der Schweiz primär die Funktion einer Abfallentsorgungsanlage, wobei die Nutzung der bei der Verbrennung frei werdenden Energie in Form von Wärme und Strom zunehmend wichtiger wird. Infolge des Entsorgungsauftrags können die KVA ihre CO₂-Emissionen nur bedingt durch die Reduktion der verbrannten Abfallmenge steuern (z.B. durch vermehrte Aufbereitung von Abfällen (u.a. Kunststoffe), Reduktion von Abfallimporten), zudem emittieren sie Treibhausgase, ob Wärme und/oder Strom genutzt wird oder nicht. Zweitens kann davon ausgegangen werden, dass in absehbarer Zeit in der Schweiz nur vereinzelte zusätzliche KVA gebaut werden. Bei der Beurteilung der Umweltwirkungen der Energienutzung aus KVA geht es daher sinnvollerweise nicht um eine komplett neue KVA, sondern vielmehr um die Ausstattung der wenigen noch nicht stromproduzierenden KVA der Schweiz mit einem Stromerzeugungssystem und/oder die Nutzung der ohnehin anfallenden, aber allenfalls noch nicht vollumfänglich genutzten Wärme via Einspeisung in ein Fernwärmenetz. Im Rahmen dieser Umweltanalyse werden für die KVA daher nur die aufgrund der Energienutzung (Strom- und Wärmenutzung) entstehenden zusätzlichen Umweltwirkungen im Vergleich zu den Umweltwirkungen einer hypothetischen KVA ohne Wärmenutzung und Stromproduktion/-nutzung (Referenz) beurteilt. Diese Methodik wurde auch in der Studie zur Ermittlung einer Ökobilanz (BUWAL/AWEL 2005) benutzt, die der Nutzung der Energie aus KVA eine ausgezeichnete Ökobilanz zumisst.

Die positiven Umweltwirkungen dank der Reduktion der THG-Emissionen gegenüber der fossilen Referenz (siehe Biomasseanlagen) werden für die KVA (erneuerbarer Anteil der Stromproduktion: derzeit 50%, Tendenz fallend) deshalb als stark beurteilt, da die Reduktion in der Betriebsphase aufgrund der speziellen Methodik nicht wie bei den anderen erneuerbaren Wärmeenergieerzeugungsanlagen durch die Wirkung der THG-Emissionen in der Bauphase teilweise kompensiert wird.

WKK- und GuD-Anlagen

WKK-Anlagen und GuD-Kraftwerke auf fossiler Basis zeichnen sich selbstredend durch einen vergleichsweise hohen Verbrauch an fossilen Brennstoffen sowie hohe Emissionen von THG und Schadstoffen aus. Im Gegensatz zu den Emissionen der Stromerzeugungsanlagen auf der Basis erneuerbarer Energien fallen die Emissionen natürlich nicht primär beim Bau, sondern schwergewichtig

beim Betrieb dieser Anlagen an. In Bezug auf Naturräume/Artenvielfalt sowie Lärm sind die Unterschiede zwischen den beiden Technologien grundsätzlich gering. Bezüglich der Anlagendimensionen gibt es allerdings erhebliche Unterschiede: WKK-Anlagen gibt es sowohl in Einfamilienhäusern (klein) als auch im industriellen Bereich (eher gross). Bei GuD-Anlagen handelt es sich in der Regel um grosse Installationen.

Elektrische- und Gasnetze

Netze für den Transfer von Elektrizität oder Gas haben in der Regel viele schwache und einige stark negative Umweltwirkungen zur Folge. Diese liegen für beide Arten von Netzen mehrheitlich im Bereich der Naturräume und der Artenvielfalt.

Elektrische Hoch- und Höchstspannungs-Freileitungen sind besonders problematisch, wenn sie durch ökologisch sensible Gebiete (z.B. Schutzgebiete oder Biotop) führen, oder wenn für den Bau grössere Landwirtschafts- und/oder Waldflächen gerodet werden müssen. Sie erzeugen zudem nicht ionisierende Strahlungen (NIS), welche als stark negativ bewertet werden. Unterirdischen Leitungen (Kabel) wird eine geringere Beeinträchtigung der landschaftlichen Vielfalt attestiert. Boden, Grundwasser und Oberflächengewässer werden jedoch durch den Bau und Betrieb eines erdverlegten Kabels stärker beeinträchtigt als durch eine Freileitung (in der Wirkungsmatrix nicht abgebildet). Gasnetze haben nur schwache Umweltwirkungen im Bereich der landschaftlichen Vielfalt und der Flächennutzung. Sie ist die einzige der betrachteten Technologien, für die das Störfallrisiko bzw. dessen mögliche Folgen als sehr hoch beurteilt werden.

Weitere Kriterien für die Gesamtbeurteilung der Technologien, Ansatz für Technologieportfolio

Für die Gesamtbeurteilung der untersuchten Technologien und die Folgerungen, welche Technologien unter Mitberücksichtigung der Umweltauswirkungen am stärksten gefördert werden sollten, reichen die Analysen aus reiner Umweltsicht nicht aus. Um sich ein Gesamturteil bilden zu können, bedarf es zusätzlicher Kriterien. Als weitere relevante Kriterien nebst der Umweltwirkung erachten die Autoren dieses Berichts insbesondere den Beitrag zur Funktionsfähigkeit/Sicherheit der Energieversorgung (Fragen: Welche Funktion und Bedeutung hat eine Technologie als Komponente der Schweizer Stromversorgung? Ist sie durch eine andere austauschbar?), den Ausschöpfungsgrad einer Technologie (Wie ausgereizt sind die Potenziale? Gibt es weitere geeignete Standorte?) sowie das Verhältnis „Nutzen zu Umweltwirkungen“ (Mit welchen Technologien kann bei vertretbarer Umweltwirkung ein energetisch relativ grosses Restpotenzial erschlossen werden?). Mittels dieser Zusatzkriterien wurde ein Ansatz skizziert, um ein Portfolio von aus Umweltsicht günstigen Technologien entwickeln zu können. Das Ergebnis dieser umfassenderen Beurteilung der Technologien anhand der obigen Kriterien ist in Tabelle 2 (siehe nächste Seite) dargestellt.

Strategische Folgerungen

Aufgrund der Ergebnisse der Analyse der Umweltwirkungen sowie der technologieübergreifenden Überlegungen können vier strategische Folgerungen gezogen werden:

1. Jede der betrachteten Technologien (mit Ausnahme der KVA, bei der gewählten Methodik) hat gewisse negative Umweltwirkungen.

2. Die Umweltwirkungen einer Anlage werden nur zu einem Teil durch die eingesetzte Technologie per se bestimmt. Die Qualität der Standortwahl und die Auslegung der Anlage üben (bei gleicher Technologie) in der Regel einen ebenso grossen Einfluss auf die Umweltwirkungen aus.
3. Beim Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien kann nicht mechanistisch auf die aus Umweltsicht beste Technologie gesetzt werden, sondern es ist primär die Technologie zu fördern, deren Umweltkennlinie im Zeitpunkt der Wahl bzw. Realisierung am betrachteten Standort im Vergleich zu den anderen „tiefer liegt“.
4. Eine projekt- und standortspezifische Umweltanalyse ist bei jeder der betrachteten Technologien unerlässlich.

Tabelle 2 Portfolio bevorzugter Technologien unter Berücksichtigung der Umweltwirkungen, der funktionalen Bedeutung, der Nutzen-/Wirkungs-Relation und der Umweltkennlinie (Ausschöpfungsgrad) der Technologie. Lesebeispiele: 1) Neue Wasserkraftwerke an Fließgewässern haben in der Regel stark negative Umweltwirkungen, insbesondere weil das nachhaltig nutzbare Potenzial weitgehend ausgeschöpft ist. 2) PV-Anlagen auf Gebäuden haben sehr geringe Umweltwirkungen, das Restpotenzial ist noch sehr gross, daher werden die Umweltwirkungen erst sehr langfristig zunehmen (wenn praktisch alle Gebäude genutzt sind.)

Energiestrategie 2050 - Umweltanalyse und Bewertung der Technologien					
Technologien: Folgerungen, Empfehlungen betr. Ausbau					
	Nr.	Technologietyp	Technologievariante	Funktionale Beurteilung	
				Sonderstellung Ausbau	
Anlagen zur Energieerzeugung					
Erneuerbare Energien	1	Wasserkraft	Kleinwasserkraft Laufkraftwerke Speicherkraftwerke Pumpspeicherkraftwerke	Strom-Speicher	
	2	Windkraft	Kleinanlagen < 250 KW _{el} Grossanlagen > 250 KW _{el} Windparks (>3 Anlagen)		
	3	Solarenergie	Solarthermische Produktion Photovoltaik gebäudebezogen Photovoltaik, Freiflächenanlagen		
	4	Biomasse	Industrielle/gewerbliche Vergärungsanlagen Landwirtschaftliche Biogasanlagen Holz-Heizkraftwerk	(Regelbare Energieproduktion)	
	5	Geothermie	Geotherm. Syst. zur Nutzung tiefer Aquifere Stimulierte geothermische Systeme (EGS)	(Regelbare Energieproduktion)	
	6	Kehrichtverbrennung	KVA (nur Stromproduktion)		
	Fossile Energien	7	Fossile Energiesysteme	Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen (WKK) GuD-Kraftwerke (Stromgeführt)	(Regelbare Energieproduktion)
	Netze				
		8	Elektrizitätsnetz	Freileitungen Kabel	Strom-Übertragung Strom-Übertragung
		9	Gasnetz	Gasnetz	
			geringe negative Umweltwirkungen, gute Standorte noch verfügbar -> Förderung/Ausbau dieser Technologie mit höchster Priorität		
		beste Standorte ausgeschöpft, daher etwas erhöhte Umweltwirkungen -> vorsichtige Förderung/Ausbau dieser Technologie			
		stark negative Umweltwirkungen -> Auf Förderung/Ausbau dieser Technologie nach Möglichkeit verzichten			
		stark negative Umweltwirkungen, Technologie ist funktional für Erhalt Versorgungssicherheit notwendig -> Ausbau unumgänglich			
		Potenzial vermutlich ausgeschöpft			

Technologiespezifische
Folgerungen und Emp-
fehlungen:

Die Folgerungen und Empfehlung in Bezug auf die einzelnen Technologien:

Wasserkraft

Wasserkraft: Aus Umweltsicht soll in erster Linie die Effizienz bestehender Anlagen gesteigert werden, dies wo immer möglich in Kombination mit einer ökologischen und landschaftlichen Sanierung. Ebenso sind an bestehende Infrastrukturen gebundene Anlagen zu fördern, da diese aus ökologischer und landschaftlicher Sicht meist unbedenklich sind. Erst in letzter Priorität sollen Neuanlagen realisiert werden, dies im Rahmen der nachhaltig nutzbaren Potenziale, also mit grösstmöglicher Effizienz und lediglich an Standorten, an denen das Verhältnis zwischen energetischem Nutzen und den Kosten durch die ökologische und landschaftliche Beeinträchtigung optimiert werden kann. Dieses Verhältnis ist bei Kleinanlagen in der Regel ungünstiger.

Zur Förderung des Ausbaus erneuerbarer Energien und deren problemlose Integration in das Schweizer Elektrizitätsnetz wird ein gewisser Ausbau der Pumpspeicherkraftwerke unumgänglich sein.

Windkraft

Windkraft: Solange der Ausschöpfungsgrad noch tief liegt, d.h. in den nächsten beiden Jahrzehnten, wird das Verhältnis von zusätzlicher Energieproduktion zu akzeptierten Umweltwirkungen als vertretbar betrachtet. Falls eine hohe Qualität von Standortwahl und technischem Konfliktlösungsmöglichkeiten sichergestellt werden kann, sollte die Windkraft unter den Technologien eingereicht werden, deren Ausbau bis auf weiteres grundsätzlich möglich ist.

Solarenergie

Solarenergie: Sowohl die solarthermischen Anlagen wie auch die gebäude- oder anlagebezogenen Photovoltaikanlagen zeichnen sich durch geringe Umweltwirkungen aus. Zudem ist das nachhaltig nutzbare Potenzial sehr gross. Der Ausbau sollte daher stark forciert werden. Bei der Förderung ist darauf zu achten, dass voll in die Dachflächen oder Fassaden integrierte und möglichst grossflächige, d.h. das ganze Dach oder die ganze Fassade abdeckende, PV-Anlagen am stärksten portiert werden. Auf den Ausbau der Freiflächen-PV-Anlagen sollte angesichts der deutlich grösseren Umweltwirkungen und der Konkurrenz zu anderen Flächennutzungen verzichtet werden.

Biomasse

Biomasse: Die Biomasseanlagen haben im Hinblick auf den Ausbau der erneuerbaren Energien die vorteilhafte Eigenschaft, dass ihre Energieproduktion grundsätzlich regelbar ist. Der Ausbau der Biomasseanlagen sollte in den kommenden Jahrzehnten ebenfalls gefördert werden. Dabei ist auf eine sorgfältige Standortwahl zu achten. Falls die Versorgung mit Brennstoff aus der Region kritisch erscheint, sollte jedoch auf die Realisierung von Biomasseanlagen verzichtet werden.

Geothermie

Geothermie: Der Ausbau der Geothermieanlagen sollte ebenfalls forciert werden, was die Klärung einer Reihe offener Fragen bedingt. Dazu zählen insbesondere die in der Praxis erschliessbaren Potenziale (auf dem relativ hohen Temperaturniveau, das es zur Stromerzeugung braucht), das Risiko bei der Realisierung von stimulierten geothermischen Systemen und der Grad der erwarteten Kostendegression.

KVA

KVA: Die Optimierung und Nachrüstung von KVA mit Stromerzeugungssystemen, welche die Stromproduktion der KVA erhöhen, sowie die Einspeisung al-

lenfalls noch nicht genutzter Wärme in ein Fernwärmenetz wird aus Umweltsicht grundsätzlich sehr befürwortet. Das Stromerzeugungspotenzial der KVA sollte mit erster Priorität so weit wie sinnvoll ausgereizt werden. Da die Verbrennung von Abfällen in KVA der aus ökologischer Sicht anzustrebenden Schliessung der Stoffkreisläufe entgegenläuft sollten jedoch keine neuen KVA gebaut werden.

WKK- und GuD-Anlagen

WKK-Anlagen und GuD-Kraftwerke: Aus Umweltsicht sollte auf den Bau bzw. Ausbau von fossil befeuerten Stromerzeugungsanlagen nach Möglichkeit verzichtet werden. Bei einem massiven Ausbau des Anteils der Stromerzeugungstechnologien mit fluktuierender Produktion (v.a. Windkraft- und Photovoltaikanlagen) dürften jedoch die Eigenheit der WKK- und GuD-Anlagen, dass deren Energieproduktion grundsätzlich regelbar ist, eine zunehmende Bedeutung erlangen. Falls der Ausbau der erneuerbaren Energie und die Steigerung der Energieeffizienz nicht ausreichen, um nach dem Abschalten der grossen KKW die schweizerische Stromversorgung sicher zu stellen, braucht es zusätzliche Kriterien, um abzuwägen, ob fossile Energiesysteme oder der Ausbau der Importe von Strom aus dem Ausland zu bevorzugen sind.

Elektrische- und Gasnetze

Elektrizität- und Gasnetze: Die beiden Energieübertragungssysteme bilden zwei lebensnotwendige Systeme der Schweizerischen Energieversorgung, auf die nicht verzichtet werden kann. Wenn der Anteil der erneuerbaren Stromerzeugung wie geplant ausgebaut werden soll und wenn die zentralisierte Struktur des heutigen elektrischen Netzes (Grosskraftwerke als Quellen, dezentrale Verbraucher) durch ein stärker dezentralisiertes Netz ersetzt werden soll, muss massiv in den Um- und Ausbau des elektrischen Netzes investiert werden. Das Gasnetz ist hingegen auch für den Ausbau der fossilen Energieerzeugungsanlagen (inkl. mehrerer Gaskraftwerke) gerüstet.

1 EINLEITUNG

1.1 Ausgangslage und Auftrag

Der Bundesrat hat am 25. Mai 2011 beschlossen, dass die bestehenden Kernkraftwerke am Ende ihrer sicherheitstechnischen Betriebszeit vom Netz genommen und in der Schweiz keine neuen Kernkraftwerke gebaut werden. In diesem Zusammenhang will der Bundesrat die Energiestrategie neu ausrichten, wozu er folgende Prioritäten formuliert hat: Verstärkung der Energieeffizienz, Ausbau der Wasserkraft, Ausbau des Anteils erneuerbarer Energien und Deckung des Restbedarfs durch zusätzliche fossile Stromproduktion – primär durch Wärme-Kraft-Koppelung (WKK) und sekundär durch Gaskombikraftwerke (GuD) – sowie durch Importe. Der Bundesrat hat dabei auch festgehalten, dass die heutigen Klimaziele weiterverfolgt werden sollen.

Das UVEK wurde beauftragt, in Zusammenarbeit mit den zuständigen Departementen diese Neuausrichtung der Energiestrategie zu konkretisieren. Im Rahmen der „Interdepartementalen Arbeitsgruppe Energie“ wurde das BAFU beauftragt, die Massnahmen der neuen Energiestrategie aus Umweltsicht zu analysieren.

Zusätzlich zur Umweltanalyse der Massnahmen sollen ausgewählte Technologien zur Erzeugung von Strom aus erneuerbarer Energie sowie aus fossilen Brennstoffen betrachtet und beurteilt werden. Damit sollen fundierte Grundlagen für die Beurteilung und Wahl der erneuerbaren Energien aus Sicht der Umwelt geliefert werden. Die vorliegende Umweltanalyse der Technologien zeigt diese Umweltwirkungen auf.

Am 21. Oktober 2011 hat das BAFU die Arbeitsgemeinschaft Ecosens/INFRAS mit dem Mandat „Energiestrategie 2050: Umweltanalyse und Bewertung der Massnahmen“ beauftragt.

1.2 Vorgehen und Rahmenbedingungen

Vorgehen

Gemäss Auftrag ist „mit der Umweltanalyse der Technologien eine systematische Übersicht der generellen Umweltauswirkungen der verschiedenen Anlagentypen zur Produktion von Strom mit erneuerbaren Energien und der Netze zu erarbeiten. Dabei sind die Risiken, Chancen, Vor- und Nachteile aus Sicht der Umwelt aufzuzeigen. Wo diese möglich und sinnvoll sind, soll mit Szenarien aufgezeigt werden, auf welche Weise die beabsichtigten Produktionsziele erreicht werden können.“

Rahmenbedingungen

- Der Fokus liegt auf den Stromerzeugungsanlagen. Da jedoch eine Reihe von Energieerzeugungsanlagen auf der Basis erneuerbarer Energien (z.B. Holzheizkraftwerk, Geothermieanlage, KVA) auch Wärme produziert und sich die Wirkungen der Strom- und Wärmeerzeugung aus Umweltsicht nicht ohne weiteres den entsprechenden Anlagenteilen zuordnen lassen, wurde bei diesen Anlagen die Umweltwirkungen der gesamten Energieerzeugung beurteilt.
- Bei den Umweltwirkungen stehen folgende vier Hauptkriterien im Vordergrund: Naturräume und Artenvielfalt; Treibhausgasemissionen; Belastungen von Mensch und Umwelt durch Schadstoffe, Lärm und Strahlung; Risiken von Umweltkatastrophen (weitere Angaben dazu siehe Anhang A „Zusatzinformationen zu den Umweltkriterien U1–U5“, das Umweltkriterium nachhaltige Ressourcennutzung und Ressourceneffizienz wurde nachträglich in Absprache mit BAFU für die Beurteilung gestrichen, siehe Kapitel 2.2.).
- Zum Zeitpunkt der Bearbeitung der Beurteilungsblätter für die ausgewählten Technologien lagen die Resultate von BFE und PROGNOSE zu den aktualisierten Potenzialen der einzelnen Technologien noch nicht vor. Ohne aktuelle Datengrundlage schien es daher wenig sinnvoll, Szenarien auszuarbeiten, um aufzuzeigen, wie die Produktionsziele erreicht werden können. Die Analyse der Technologien konzentrierte sich daher auf deren Umweltwirkungen, Chancen und Risiken.
- Bei der Mehrheit der Umweltkriterien können die Umweltwirkungen nur qualitativ oder semiquantitativ ausgewiesen werden. Wo möglich (z.B. im Bereich der Treibhausgasemissionen oder der Flächennutzung) wurden jedoch spezifische Kennwerte ermittelt, die eine quantitative Beurteilung und damit einen Vergleich der verschiedenen Technologien bzgl. dieses Kriteriums zulassen. Alle anderen Umweltwirkungen wurden in den Beurteilungsblättern in einer 5-stufigen Skala von stark positiv bis stark negativ qualifiziert (siehe Kapitel 3.3, Kapitel 5.1 und Beurteilungsblätter im Anhang).

2 GRUNDLAGEN

2.1 Begriffe, Abgrenzung Technologien

Begriffe

Ziel der vorliegenden Studie ist die Erarbeitung einer systematischen Übersicht zu den Umweltauswirkungen der verschiedenen Anlagentypen bzw. Technologien und zur Produktion von Strom und Wärme. Für die Analyse der verschiedenen Anlagentypen werden nebst den Hauptkategorien (Technologien wie z.B. Wasserkraft, Windkraft, Solarenergie) auch diverse Unterkategorien (z.B. Laufkraftwerke, Speicherkraftwerke, Photovoltaik- oder solarthermische Anlagen) betrachtet. In diesem Bericht werden daher die folgenden Begriffe gebraucht:

Tabelle 3 Begriffsdefinition

Begriff	Beschreibung	Beispiele
Technologie	Oberbegriff, der alle Anlagen und Technologien zur Erzeugung, für den Transport oder die Verteilung von Strom und Wärme umfasst. Er schliesst sowohl Anlagen zur energetischen Nutzung von erneuerbaren wie auch fossilen Energien mit ein.	
Technologietyp	bezieht sich auf Hauptkategorien der betrachteten Technologien (wird als Synonym für Anlagentyp verwendet)	Wasserkraft, Windkraft, Solarenergie, fossile Energiesysteme
Technologievariante	bezeichnet sich auf die Unterkategorien der betrachteten Technologien	Solarthermisch/elektrische Stromproduktion, PV-Anlagen gebäudebezogen oder freistehend

Abgrenzung Technologien

Der Fokus der Analyse liegt auf den Technologien zur Erzeugung von Strom auf der Basis erneuerbarer Energien. Im Sinne einer vollständigen Gesamtübersicht werden ergänzend auch die im Rahmen der Energiestrategie 2050 relevanten Produktionstechnologien mit fossilen Brennstoffen, namentlich fossile WKK- und GuD-Anlagen, sowie die Umweltauswirkungen der Netze (Elektrizität und Gas) untersucht.

Tabelle 4 zeigt die total neun analysierten Technologien, differenziert nach insgesamt 21 Varianten, in der Übersicht.

Tabelle 4 Untersuchte Technologien.

	Nr.	Technologietyp	Nr.	Technologievariante
Anlagen zur Energieerzeugung				
Erneuerbare Energien	1	Wasserkraft	1.1	Kleinwasserkraft
			1.2	Laufkraftwerke
			1.3	Speicherkraftwerke
			1.4	Pumpspeicherkraftwerke
	2	Windkraft	2.1	Kleinanlagen < 250 KW _{el}
			2.2	Grossanlagen > 250 KW _{el}
			2.3	Windparks (>3 Anlagen)
	3	Solarenergie	3.1	Solarthermische Produktion
			3.2	Photovoltaik gebäudebezogen
			3.3	Photovoltaik, Freiflächenanlagen
	4	Biomasse	4.1	Industrielle/gewerbliche Vergärungsanlagen
			4.2	Landwirtschaftliche Biogasanlagen
			4.3	Holzheizkraftwerk
	5	Geothermie	5.1	Geotherm. Syst. zur Nutzung tiefer Aquifere
			5.2	Stimulierte geothermische Systeme (EGS)
6	Kehrichtverbrennung	6.1	KVA	
Fossile Energien	7	Fossile Energiesysteme	7.1	Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen (WKK)
			7.2	GuD-Kraftwerke (Stromgeführt)
Netze				
	8	Elektrizitätsnetz	8.1	Freileitungen
			8.2	Kabel
	9	Gasnetz	9.1	Gasnetz

2.2 Umweltkriterien

Für die vorliegende Beurteilung der Umweltwirkungen wurden vom BAFU die fünf Umweltkriterien U1–U5 gemäss Kapitel **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** und Anhang A vorgegeben. Sie enthalten insgesamt zehn Unterkriterien. Wir haben zusätzlich das Unterkriterium „NIS und Lärm“ in diese zwei separaten Bereiche unterteilt, sodass wir anfänglich elf Unterkriterien bewertet haben.

In der Begleitgruppensitzung vom 19. Januar 2012 wurde beschlossen, das Kriterium U2 „nachhaltige Ressourcennutzung und Ressourceneffizienz“ mit den beiden Unterkriterien „erneuerbare“ und „nicht erneuerbare Ressourcen“ zu streichen. Auf die Bewertung der erneuerbaren Ressourcen (betrifft vor allem Wasser, Holz und direkte Sonnenenergie) wurde verzichtet, weil ihre Verwendung an sich keine relevante Umweltbelastung darstellt. Die *Folgen* ihrer Nutzung, z.B. Luftschadstoffemissionen bei der Holzverbrennung oder geringere Restwassermengen bei der Wasserkraft, werden bei den entsprechenden Umweltkriterien (z.B. Luftschadstoffe) bewertet. Auf die Bewertung der nicht erneu-

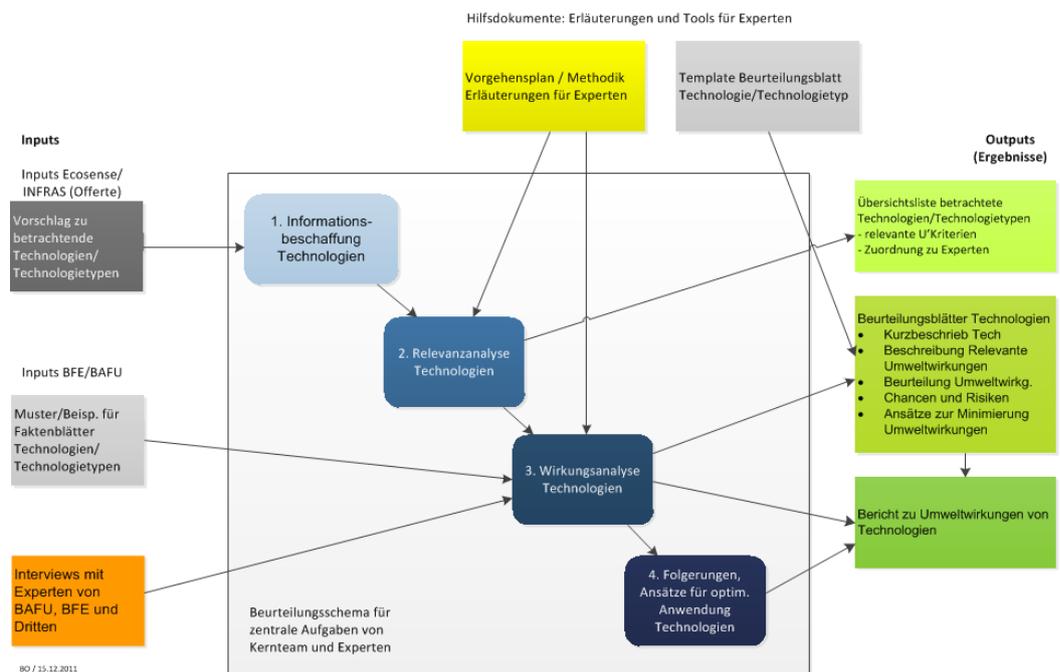
erbaren Ressourcen (betrifft vor allem Uran und seltene Metalle) wird verzichtet, weil sie im vorliegenden Kontext im Ausland abgebaut werden. Somit haben wir vier Umweltkriterien mit neun Unterkriterien bewertet (vgl. Kapitel 5.1. und Tabellen mit Farbcode jeweils auf Seite 1 der Beurteilungsblätter in Anhang E).

3 VORGEHEN UND METHODIK

3.1 Vorgehen

Die systematische Analyse der Umweltwirkungen der ausgewählten Technologien erfolgte im Wesentlichen in vier Schritten (Figur 1).

Figur 1 Vorgehen in vier Schritten.



3.2 Arbeitsschritte

Arbeitsschritt 1: Informationsbeschaffung

Im ersten Arbeitsschritt wurden die vorliegenden Informationen zu Umweltwirkungen der einzelnen Technologien gesammelt. Dazu wurde eine umfassende Literatur- und Internetrecherche durchgeführt. Die Abgrenzung und die Stichworte der Literaturrecherche wurden auf der Basis der Erfahrung der Studienautoren in einem Brainstorming determiniert.

Arbeitsschritt 2: Relevanzanalyse

In diesem Schritt erfolgte die Analyse der Relevanz der Umweltwirkungen der betrachteten Technologien bzgl. eines bestimmten Umweltkriteriums. Dabei wurde für jede der 21 Technologievarianten (vgl. Tabelle 4) beurteilt, welche Relevanz sie bezüglich der neun vorgegebenen Umweltkriterien besitzt. Als Ba-

sis der Beurteilung dienten die aus dem vorhergehenden Schritt verfügbaren Informationen sowie die Beurteilung der Studienautoren.

Die Beurteilung wurde in Form einer Relevanzmatrix festgehalten.

Arbeitsschritt 3: Wirkungsanalyse, Erstellung Beurteilungsblatt

Auf der Basis der groben Relevanzanalyse sowie der verfügbaren Informationen wurde in einem nächsten Schritt eine verfeinerte Wirkungsanalyse durchgeführt. Dabei wurden Informationslücken, welche durch die Literaturrecherche oder eigene Kenntnisse und Erfahrungen nicht gedeckt werden konnten, durch Telefoninterviews mit Experten aus der Bundesverwaltung (v.a. BAFU, BFE) sowie von Verbänden und aus der Privatwirtschaft geschlossen. Die Liste der Interviews mit den thematischen Schwerpunkten und den Namen der befragten Experten findet sich in Anhang B. Die Ergebnisse der Wirkungsanalyse wurden auf zwei Arten festgehalten:

- in einer Übersicht in Form der verfeinerten Wirkungsmatrix (Darstellung siehe Kapitel 5.1 (vereinfacht) und Anhang C (detailliert)).
- in Beurteilungsblättern für jeden Technologie-/Anlagentyp (Aufbau und Inhalt siehe Kapitel 5.1).

Arbeitsschritt 4: Folgerungen, Ansatz zur Bildung des optimalen Technologieportfolios

Anhand der Beurteilung der einzelnen Technologien wurde in einem letzten Schritt soweit möglich versucht, Folgerungen hinsichtlich der optimalen Kombination von einzelnen Technologietypen und -varianten aus der Sicht der Umwelt zu ziehen. Zudem wurde mit Hilfe weiterer Kriterien für die Gesamtbeurteilung der Technologien ein Ansatz für die Bildung eines umweltfreundlichen Portfolios von Technologien formuliert.

3.3 Methodik für Wirkungsanalyse

Rahmenbedingungen, Referenzszenario

In Absprache mit dem BAFU wurden die wichtigsten Rahmenbedingungen wie folgt festgelegt:

- **Betrachtung einzelner Technologien:** Die Analyse und Beurteilung der Umweltwirkungen bezieht sich auf die jeweilige Betrachtung einer einzelnen Technologie. Dabei wird angenommen, dass die betrachtete Technologievariante von den anderen unabhängig ist bzw. dass die Umweltwirkungen der anderen Technologien die Umweltwirkungen der jeweils analysierten Technologie nicht beeinflussen. Ein Vergleich von Technologietypen findet, wo sinnvoll, erst im Rahmen der übergeordneten Folgerungen statt (vgl. Arbeitsschritt 4, Ergebnisse in den Kapiteln 5 und 7).

- **Anlagestandorte in der Schweiz:** Die vorliegende Umweltanalyse beschränkt sich auf Anlagen mit Standort in der Schweiz.
- **Referenz** für die Beurteilungen der Umweltwirkungen ist der Status Quo, d.h. der IST-Zustand der Energieversorgung. Die Umweltwirkungen der betrachteten Technologien werden im Vergleich zu einer hypothetischen Null-aktivität (keinerlei Investitionen in irgendwelche Energieerzeugungsanlagen) bzw. zu einer „grünen Wiese“ beurteilt.
Das ist insbesondere von Bedeutung bei der Beurteilung der Umweltwirkungen auf Naturräume und Artenvielfalt: Diese geht davon aus, dass Gebäude, Werkhöfe und weitere Teile von Energieerzeugungsanlagen auf bisher nicht genutzten Flächen gebaut werden und nicht z.B. in bisher anders genutzten Industriezonen. *Damit hat praktisch jede Investition in Energiesysteme, auch auf der Basis erneuerbarer Energien, negative Umweltwirkungen.*
Die Beurteilung differenziert zwischen Strom und Wärme wie folgt:
Strom: Aufgrund der gewählten IST-Referenz und des heute nahezu CO₂-freien Stromproduktionsmix der Schweizer Stromerzeugungsanlagen werden in dieser Studie *keine Potenziale für die Reduktion von Treibhausgasemissionen* dank des Ausbaus von Stromerzeugungsanlagen auf der Basis erneuerbarer Energien geltend gemacht.
Wärme: Ausgehend vom Status Quo berücksichtigt die Analyse der Umweltwirkungen in der Betriebsphase den heutigen Wärmebedarf (für die Heizung von Gebäuden) in der Umgebung einer neuen Energieerzeugungsanlage, die nebst Elektrizität auch Wärme generiert (z.B. Holzheizkraftwerk, KVA, Geothermieanlage) und geht davon aus, dass diese Wärme heute auf fossiler Basis generiert wird. Damit wird *jeder Wärmeerzeugungsanlage auf der Basis erneuerbarer Energien (Beispiele oben) ein Potenzial zur Reduktion von Treibhausgasemissionen sowie des Verbrauchs fossiler Energieträger attestiert.*

Analyseraster

Im Zentrum der Untersuchungen steht die Analyse und Beurteilung der Umweltwirkungen eines bestimmten Technologietyps. Zudem werden für jeden Technologietyp auch die folgenden Aspekte beurteilt:

- Chancen und Risiken des Technologietyps: Darstellung der betrachteten Technologievarianten und allenfalls Vergleich mit optional verfügbaren Technologievarianten (z.B. Photovoltaik dezentral auf Gebäuden vs. Photovoltaik Freiflächen-Grossanlagen),
- Handlungsansätze und potenzielle Instrumente zur Minimierung der Umweltwirkungen einer Technologie.

Die Methodik für die Analyse der Umweltwirkungen wird in den folgenden Abschnitten beschrieben, die Darstellung der Ergebnisse in Form des oben erwähnten Beurteilungsblattes für jede Technologie in Kapitel 5.

Informationsgrundlagen

Basis für die Analyse und Beurteilung der Umweltwirkungen bilden:

- die Ergebnisse der Literaturrecherche und Informationsbeschaffung gemäss Arbeitsschritt 1,
- die Unterlagen des BAFU,
- die Kenntnisse und Erfahrungen der Studienautoren,
- Interviews mit ausgewählten Experten: Wo aufgrund der verfügbaren Informationen und Kenntnisse Lücken verblieben sind, ist versucht worden, diese durch Interviews mit ausgewählten Experten zu schliessen (vgl. Kapitel 3.2).

Wissenslücken, Unsicherheiten

Wo auch nach der Informationsbeschaffung und den Interviews mit Experten relevante Wissenslücken oder Unsicherheiten verbleiben, welche die Analyse und Beurteilung der Umweltwirkungen beeinträchtigen oder verunmöglichen, werden diese im Beurteilungsblatt und Bericht explizit vermerkt.

Qualitative und quantitative Analyse/Ergebnisse

Der Rahmen dieses Teilprojekts erlaubt in der Regel keine quantitativen Analysen, sondern muss sich auf qualitative und semiquantitative Aussagen und Beschreibungen beschränken. Dort wo vorhanden, werden jedoch quantitative Aussagen und Kennwerte benutzt und in den Beurteilungsblättern aufgeführt. Die benutzten quantitativen Kenngrössen und Aussagen werden im folgenden Abschnitt Umweltkriterien explizit erläutert.

Umweltkriterien

Als Umweltkriterien dienen primär die vorgegebenen Umweltkriterien des BAFU (Tabelle 5, siehe nächste Seite).

Fallweise wurden bei der Analyse der Umweltwirkungen der Technologien auch einige weitere ausgesuchte Aspekte betrachtet. Dazu gehören insbesondere:

- Umweltbereiche, die als wesentliche Schutzgüter eingestuft werden (z.B. Grundwasser).
- Die Verfügbarkeit und der Verbrauch von erneuerbaren und nicht erneuerbaren Ressourcen für die Fabrikation von Schlüsselkomponenten einer Technologie, den Bau sowie den Betrieb einer Anlage (z.B. Biomasse inkl. Holz, seltene Metalle, fossile Brennstoffe).

Tabelle 5 Beschreibung der Umweltkriterien und Quantifizierungsmöglichkeiten.

Umweltbereich	Umweltkriterium	Auswirkungen der Technologie...	Quantifizierungsmöglichkeit
Naturräume, Artenvielfalt	Biodiversität	... auf geschützte Arten/Lebensräume (Wasser, Wald Gebirge, Boden)?	-
	Landschaftliche Vielfalt	... auf Landschaften (inkl. Siedlungen, Naherholungsgebiete, Parks, Moore, BLN)?	-
	Flächennutzung	... auf den Verbrauch bzw. die Nutzung von Flächen (Versiegelung, Zersiedelung)?	genutzte Fläche pro erzeugte kWh
Klima	Treibhausgase (THG), fossile Energieträger	... auf die Emission von THG (CO ₂ , Methan) und auf den Verbrauch von fossilen Energieträgern (Öl, Gas)	CO ₂ -Emissionen pro erzeugte kWh
Schadstoffe, Lärm, NIS	Schadstoffemissionen	... auf die Emission von Schadstoffen (NO _x , SO ₂ , PM (Feinstaub)), die in Luft, Boden oder Wasser gelangen?	Schadstoff-Emissionen pro erzeugte kWh
	Lärm	... auf Lärmemissionen?	-
	Nicht ionisierende Strahlung (NIS)	... auf NIS?	-
Risiken	Naturgefahren	... auf das Risiko der Verstärkung bzw. Auslösung von Naturgefahren (Rutschungen, Steinschlag, Erdbeben, Lawinen, Hochwasser)?	-
	Störfall	... auf das Risiko von Störfällen und Störfallkatastrophen?	-

4 GRUNDSÄTZE ZUR ANALYSE DER UMWELTWIRKUNGEN

In Bezug auf ein spezifisches Umweltkriterium müssen bei der Beurteilung mehrerer Technologien dieselben Überlegungen angestellt werden, um zu entscheiden, ob eine Wirkung relevant ist oder nicht, und ob die Wirkung stark oder schwach ist. Diese allgemeinen, oft übertragbaren Grundsätze werden im Folgenden für die neun primären Umweltunterkriterien einzeln dargelegt.

Bei allen Umweltkriterien wurden aufgrund der Lebenszyklusbetrachtung nicht nur die mittel- und langfristigen Wirkungen einer Technologie in der Betriebsphase, sondern auch die mehrheitlich kurzfristigen (temporären) Auswirkungen beim Bau und bei der Stilllegung einer Anlage analysiert.

Biodiversität

Bei der Beurteilung der Wirkung auf die Biodiversität wurden insbesondere (1) die Grösse der betroffenen Flächen, (2) die Anzahl, (3) die ökologische Qualität und (4) die Gefährdung der darin vorkommenden Habitate und Arten bzw. Artengruppen abgeschätzt. Bei der Beurteilung der Gefährdung wiederum wurde (a) die Seltenheit der Art bzw. des Lebensraums in der Schweiz bzw. in der Region, (b) der von der Massnahme mutmasslich betroffene Anteil des Vorkommens sowie (c) die Irreversibilität der geplanten Eingriffe berücksichtigt.

Als „gross“ wurde die Wirkung von Massnahmen z. B. dann beurteilt, wenn diese sehr grosse Flächen betreffen wie z.B. eine veränderte touristische Nutzung der Alpen oder eine systematische Brennholzgewinnung in den Wäldern. Als „gross“ wurde die Wirkung aber auch dann beurteilt, wenn davon die letzten verbliebenen Reste von bereits im 19. und/oder im 20. Jahrhundert stark dezimierten Lebensräume gefährdet sind, wie z.B. kleine und grosse Fliessgewässer mit naturnahem Abflussregime, Trockenstandorte, Feuchtgebiete.

Landschaftliche Vielfalt

Eine Beeinträchtigung der landschaftlichen Vielfalt nehmen wir dann an, wenn die Massnahme voraussichtlich verstärkt zu neuen oder weiter intensivierten anthropogenen Eingriffen in die Natur- und Kulturlandschaft führt; dies insbesondere dann, wenn tendenziell bisher wenig oder kaum genutzte Landschaftsbereiche in den Fokus der neuen Nutzung geraten. Anthropogene Eingriffe führen häufig zu einer beschleunigten Landschaftsveränderung mit der Folge der Banalisierung der landschaftlichen Eigenarten und Vielfalt. Finden die Eingriffe im anthropogen bereits stärker veränderten Landschaftsbereich (wie Siedlungsgebiet, siedlungnahe Bereiche, durch bestehende Infrastruktur geprägte Räume etc.) statt, wird die negative Auswirkung auf die landschaftliche Vielfalt als weniger markant angesehen.

Flächennutzung

Bei der Beurteilung der Wirkung auf die Flächennutzung wurden insbesondere die Grösse der betroffenen Flächen, das Ausmass der Neuversiegelung und der Verlust der Flächen für andere bisherige oder potenzielle Nutzungen abgeschätzt. Dabei ist in vielen Fällen eine gewisse Überschneidung mit dem Kriterium der Biodiversität (siehe oben) nicht zu vermeiden. Wenn hingegen Flächen mit mutmasslich geringem Wert für die Biodiversität betroffen sind, kann die Beurteilung durchaus unterschiedlich zu dieser ausfallen.

Wo Daten vorliegen, berücksichtigt die Beurteilung der Technologien die spezifische Flächennutzung (pro erzeugte kWh) (vgl. Kapitel 5.1).

Treibhausgase/fossiler Energieverbrauch

Bei diesem Umweltkriterium braucht es eine differenzierte Beurteilung:

- Unterschiede nach Lebenszyklusphasen: Auch wärme- oder stromproduzierende Anlagen auf der Basis erneuerbarer Energien verursachen gewisse THG-Emissionen. Der weitaus grösste Teil fällt in der Regel in der Bauphase an. Damit dominieren in dieser Phase in Bezug auf das Kriterium THG-Emissionen und Verbrauch fossiler Energieträger die negativen Wirkungen (Zunahme der Emissionen bzw. des Verbrauchs fossiler Ressourcen).
- Strom: Aufgrund der gewählten IST-Referenz und des heute nahezu CO₂-freien Stromproduktionsmix der Schweizer Stromerzeugungsanlagen werden in dieser Studie keine Potenziale für die Reduktion von Treibhausgasemissionen dank des Ausbaus von Stromerzeugungsanlagen auf der Basis erneuerbarer Energien geltend gemacht.
- Wärme: Ausgehend vom Status Quo berücksichtigt die Analyse der Umweltwirkungen in der Betriebsphase den heutigen Wärmebedarf (für die Heizung von Gebäuden) in der Umgebung einer neuen Energieerzeugungsanlage, die nebst Elektrizität auch Wärme generiert (z.B. Holzheizkraftwerk, KVA, Geothermieanlage) und geht davon aus, dass diese Wärme heute auf fossiler Basis erzeugt wird. Damit dominieren in dieser Phase bei den Wärmerzeugungsanlagen auf der Basis erneuerbarer Energien (Beispiele oben) die positiven Wirkungen (Reduktion von THG-Emissionen sowie des Verbrauchs fossiler Energieträger).
- Aufgrund der langen bis sehr langen Lebensdauern der betrachteten Energieerzeugungsanlagen nehmen wir an, dass die Wirkung der Wärmerzeugungsanlagen auf der Basis erneuerbarer Energien in Bezug auf die THG-Emissionen und den Verbrauch fossiler Ressourcen per Saldo über die gesamte Lebensdauer positiv ist (per Saldo Reduktion von Emissionen und Verbrauch).

Wo Daten vorliegen, berücksichtigt die Beurteilung der Technologien die spezifischen THG-Emissionen (pro erzeugte kWh) (vgl. Kapitel 5.1).

Schadstoffe

Auch hier muss zwischen den Lebenszyklusphasen differenziert werden:

- Einhergehend mit der Zunahme der THG-Emissionen in der Bauphase, die alle Technologien bewirken, gibt es in dieser Phase tendenziell auch eine Erhöhung der Schadstoffemissionen. Diese ist u.a. abhängig von a) der eingesetzten Technologie, b) dem Umfeld und c) der Grösse und der baulichen Ausführung einer Anlage. Die Details der Schadstoffemissionen werden daher bei der Analyse der einzelnen Technologien spezifisch beurteilt.
- In der Betriebsphase, in welcher davon ausgegangen wird, dass die Wärme aus den Wärmeerzeugungsanlagen auf der Basis erneuerbarer Energien heute fossil generierte Wärme substituieren, haben diese Anlagen Wirkungen in Bezug auf die Schadstoffe. Ob diese Wirkung positiv oder negativ ist, kann jedoch nicht so eindeutig gesagt werden wie bei den THG-Emissionen. Während z.B. die Schadstoffemissionen von Holzheizkraftwerken tendenziell grösser sind als diejenigen von Öl- oder Gasfeuerungen, sind die Schadstoffemissionen von Geothermieanlagen sicher kleiner als die der fossilen Referenz. Zudem ist der Saldo der Wirkungen von Bau- und Betriebsphase zusammen im Rahmen dieser Analyse nicht bei allen Technologien eindeutig zu bestimmen. Auch dieser ist stark abhängig von den oben unter a), b), und c) aufgeführten Parametern, unter denen die Anlage betrieben wird.

Wo Daten vorliegen, berücksichtigt die Beurteilung der Technologien die spezifischen Schadstoffemissionen (pro erzeugte kWh) (vgl. Kapitel 5.1).

Lärm

Der Grossteil der betrachteten Technologien hat Lärmemissionen zur Folge. Die weitaus grösste Bedeutung hat dabei der Baulärm, d.h. der Lärm bei der Realisierung der stromerzeugenden Anlagen. Bei baulichen Aktivitäten, die eine ausgedehnte Hoch- oder Tiefbautätigkeit, insbesondere im oder am Rand eines Siedlungsgebiet(s), auslösen (z.B. Biomasse oder Geothermieanlagen), beurteilen wir den Baulärm als relevanter als die Lärmemissionen relativ kurzer (Montage-) Tätigkeiten ausserhalb des Siedlungsgebiets (z.B. Bau von Freileitungen). In der Regel wird der Baulärm jedoch als geringe Umweltwirkung eingestuft.

Nicht ionisierende Strahlung

Hier fällt nur die nicht ionisierende Strahlung (NIS) von Stromleitungen und Unterwerken (Transformatorstationen) ins Gewicht. Vor allem Höchst- und Hochspannungsfreileitungen emittieren grundsätzlich NIS, wenn auch in technisch beeinflussbarem Ausmass (wie Art der Isolation, Anordnung der Seile).

Naturgefahren¹

Unter diesem Aspekt wird in erster Linie eine Risikobeurteilung gemacht. Es gibt sehr wenige Technologien, bei denen wir das Risiko einer Naturgefahr als relevant einschätzen. Zu beachten ist, dass es nicht nur eine Erhöhung des Risikos infolge des Baus einer stromerzeugenden Anlage (z.B. stimulierte geothermische Systeme), sondern auch die Chance zur Reduktion des Risikos von Naturgefahren (z.B. Verminderung des Hochwasserrisikos durch den Bau bzw. Betrieb eines Wasserkraftwerks) gibt.

Störfall

Unter Störfällen werden Ereignisse im Sinne der Störfallverordnung verstanden (und nicht Unfälle, Schadensereignisse oder ausserordentliche Betriebszustände allgemein). Auch hier ist, analog zur Beurteilung der Naturgefahren, nur eine Risikobetrachtung sinnvoll. Mit einer Ausnahme wurden diese Störfallrisiken für alle Technologien als vernachlässigbar beurteilt. Einzig der Bau und Betrieb von Gasleitungen wird als relevantes Störfallrisiko betrachtet.

¹ Zu beachten: Bei der Beurteilung der Umweltwirkungen von Technologien auf die Naturgefahren geht es um die **Wirkung des Baus und Betriebs einer Energieerzeugungsanlage auf die Natur** und nicht umgekehrt (Auf die Umkehrung, z.B. das Risiko, dass Hochwasser oder Murgänge ein Wasserkraftwerk (Wehr, Kanäle oder Druckleitungen) beschädigen, wird in den Beurteilungsblättern der einzelnen Technologien fallweise eingegangen).

5 ERGEBNISSE DER UMWELTANALYSE

Die Ergebnisse der Analyse der Technologien werden in diesem Kapitel in folgender Form dargestellt:

- Übersicht: Wirkungsmatrix mit Umweltwirkungen nach Technologien.
- Beurteilungsblätter (Details siehe Anhang E).
- Zusammenfassende Beurteilung der Technologien aus Umweltsicht.

5.1 Darstellung der einzelnen Technologien aus Umweltsicht

Übersicht: Wirkungsmatrix

Die in der Wirkungsmatrix dargestellte zusammenfassende Beurteilung erfolgt anhand des bereits für das Teilprojekt „Umweltwirkungen Massnahmen“ benutzten Rasters. Da die Umweltwirkungen der betrachteten Technologien über den gesamten Lebenszyklus analysiert werden, bedarf dieses allerdings einer zusätzlichen Differenzierung nach den folgenden vier Lebensphasen:

- H: Herstellungsphase (inkl. Verbrauch von Rohstoffen, Baumaterialien)
- R: Realisierungs-/Bauphase (inkl. Energieverbrauch für Transporte und Bau)
- B: Betriebsphase
- S: Stilllegungs-/Rückbauphase.

Ob und in welcher der vier Phasen sich eine Umweltwirkung zeigt, wird in der Matrix mittels eines Farbcodes und den Kürzeln für die entsprechenden Lebensphasen dargestellt.

Tabelle 6 Codierte Darstellung der Umweltwirkungen (am Beispiel der Wasserkraft).

	Naturräume, Artenvielfalt			Klima Treibhausgase/ fossile Energie	Schadstoffe, Lärm, NIS			Risiken	
	Biodiversität	Landschaftliche Vielfalt	Flächennutzung		Schadstoffe	Lärm	Nicht ionisierende Strahlung	Naturgefahren	Störfall
Kleinwasserkraft	B	R, B	R, B						
Laufkraftwerke	B	R, B	R, B					B	
Speicherkraftwerke	B	R, B	R, B					B	
Pumpspeicherkraftwerke	B	R, B	R, B					B	

In jeder Zeile der obigen Tabelle wird eine Technologievariante dargestellt, die anhand der in den Spalten aufgeführten Umweltkriterien (siehe Kapitel 2.2) beurteilt wurde. Im obigen Beispiel sind alle möglichen Kombinationen der Bewertungen der Umweltwirkungen einer Technologie dargestellt. Grün bedeutet eine positive Wirkung, rot eine negative. Die dunkle Version weist auf eine starke und die helle auf eine schwache Umweltwirkung hin. Ein Feld ohne Farbe bedeutet, dass die Umweltwirkung der Technologie in diesem Bereich als vernachlässigbar eingeschätzt wird. Wo möglich sind die Umweltwirkungen innerhalb eines Umweltkriteriums quantifiziert, d.h. die Wirkung (z.B. bei den Treibhausgas- oder Schadstoffemissionen) wird pro erzeugte kWh ausgewiesen (vgl. Tabelle 7).

Damit sind die dargestellten Wirkungen innerhalb einer Spalte bis zu einem gewissen Grad vergleichbar. Ein dunkelrotes Feld in den Spalten Treibhausgas- oder Schadstoffemissionen heisst wirklich, dass die so gekennzeichnete Technologie über den ganzen Lebenszyklus mehr Emissionen verursacht als die Technologie mit einem hellroten Feld.

Tabelle 7 Schwellenwerte für die quantifizierbaren Umweltwirkungen in Bezug auf Treibhausgas- und Schadstoffemissionen sowie Flächenbedarf (Spezifische Werte pro erzeugte kWh; Quelle: BAFU 2009).

Farbcode Beurteilung	THG-Emissionen g CO ₂ /kWh	Schadstoffe NOx (mg) und PM10 (mg) Sind NOx und PM10 nicht gleich bewertet, ist jeweils die höhere Kategorie aus- schlaggebend.	Flächenbedarf (m ² /kWh)
Weiss (neutral)	<20	NOx < 100 PM10 < 100	0, bzw. Anlage wird auf bestehender Infrastruk- tur gebaut/installiert (z.B. PV auf Dach)
Hellrot	20–200	NOx 100–400 PM10 100–400	<0.02
Rot	>200	NOx > 400 PM10 > 400	>0.02

Für die Mehrheit der Umweltkriterien (z.B. Biodiversität, Landschaftliche Vielfalt oder Naturgefahren) liegen jedoch keine direkt vergleichbaren quantifizierten Daten vor. Dort sind die Umweltwirkungen qualitativ beurteilt, die einzelnen Technologien können damit nur beschränkt miteinander verglichen werden. Ein dunkelrotes Feld bei der Wasserkraft heisst in diesem Fall also nicht zwingend, dass z.B. die landschaftliche Vielfalt eines Speicherkraftwerks im genau gleichen Masse negativ beeinträchtigt wird wie die ebenfalls dunkelrot gekennzeichnete Windkraft. Gemäss unserer Einschätzung sind jedoch beides starke Umweltwirkungen. Innerhalb einer Zeile sind die Umweltwirkungen nach Umweltkriterien ohnehin nicht direkt vergleichbar. Die roten Felder einer bestimmten Technologie dürfen also keineswegs einfach zusammengezählt werden, um eine „Gesamtwirkung“ zu ermitteln.

Tabelle 8 zeigt das Resultat der Wirkungsanalyse: Die Wirkungsmatrix.

Tabelle 8 Wirkungsmatrix: Übersicht der Ergebnisse der Analyse der Umweltwirkungen aller beurteilten Technologien (Aus Gründen der Übersichtlichkeit bzw. besseren Lesbarkeit sind in dieser Darstellung die Lebenszyklusphasen nicht eingezeichnet. Eine detailliertere Darstellung der Umweltwirkungen nach Lebenszyklusphase findet sich in Anhang C).

Ergebnis der Wirkungsanalyse			Naturräume, Artenvielfalt			Klima	Schadstoffe, Lärm, NIS			Risiken	
			Biodiversität	Landchaftliche Vielfalt	Flächennutzung	Treibhausgase/ fossile Energie	Schadstoffe	Lärm	Nicht-ionisierende Strahlung	Naturgefahren	Störfall
Technologietyp	Technologievariante										
Anlagen zur Energieerzeugung											
Erneuerbare Energien	Wasserkraft	Kleinwasserkraft	■	■	■						
		Laufkraftwerke	■	■	■						■
		Speicherkraftwerke	■	■	■						■
	Windkraft	Pumpspeicherkraftwerke	■	■	■						■
		Kleinanlagen < 250 KW _{el}	■	■	■						
		Grossanlagen > 250 KW _{el}	■	■	■						
	Solarenergie	Windparks (>3 Anlagen)	■	■	■						
		Solarthermische Produktion		■	■						
		Photovoltaik gebäudebezogen		■	■						
	Biomasse	Photovoltaik, Freiflächen-Anlagen		■	■						
		Industrielle/gewerbliche Vergärungsanlagen		■	■	■	■				
		Landwirtschaftliche Biogasanlagen		■	■	■	■				■
	Geothermie	Holz-Heizkraftwerk	■	■	■						
		Geotherm. Syst. zur Nutzung tiefer Aquifere		■	■	■	■	■			
		Stimulierte geothermische Systeme (EGS)		■	■	■	■	■			■
Kehrichtverbrennung	KVA				■	■					
Fossile Energien	Fossile E'Systeme	Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen (WKK)				■	■				
		GuD-Anlagen (Stromgeführt)				■	■				
Netze											
Elektrizitätsnetz	Freileitungen		■	■							
	Kabel		■	■							
Gasnetz	Gas-Netz		■	■						■	

Legende: dunkelrot = stark negative Wirkung, blasses rot = schwach negative Wirkung, weiss = vernachlässigbare Wirkung, hellgrün = schwach positive Wirkung, dunkelgrün = stark positive Wirkung

Bemerkungen:

- Die Beurteilung der Wasserkraftanlagen betrifft Neuanlagen an Fließgewässern
- Die KVA schneidet deshalb positiv ab, weil im Rahmen dieser Umweltanalyse für die KVA nur die aufgrund der Energienutzung (Strom- und Wärmenutzung) entstehenden zusätzlichen Umweltwirkungen im Vergleich zu den Umweltwirkungen einer hypothetischen KVA ohne Wärmenutzung und Stromproduktion/-nutzung (Referenz) beurteilt werden.

Beim Vergleich einzelner Technologien ist zu beachten, dass die Umweltwirkungen von zwei Stromerzeugungsanlagen der gleichen Technologie mit gleicher Jahresproduktion in den wenigsten Fällen (trotz gleicher Farbe beim entsprechenden Umweltkriterium) identisch sein werden. Die dargestellte Intensität bildet die Wirkung einer typischen Anlage an einem durchschnittlichen Standort ab. In Wirklichkeit gibt es jedoch nur wenige solcher durchschnittlichen Anlagen. Die effektive Wirkung einer realisierten Stromerzeugungsanlage hängt in der Praxis von einer Reihe von Faktoren ab, die weder im Beurteilungsblatt noch in der Wirkungsmatrix abgebildet werden können. So kann eine Anlage besser oder weniger optimal ausgelegt werden, und für die meisten Technologien gibt es günstige oder weniger günstig gewählte Standorte. Zudem wird die Umweltwirkung bei den meisten Technologien davon abhängen, wie weit das gesamte Stromerzeugungspotenzial dieser Technologie schon ausgeschöpft ist bzw. ob

die besten Standorte alle schon genutzt sind oder es noch viele weitere vergleichbar gute Standorte gibt. Diese Faktoren werden in der Regel die in der Wirkungsmatrix abgebildeten typische Umweltwirkung deutlich reduzieren oder erhöhen. Als Folge können gut ausgelegte und positionierte Anlagen einer Technologie mit durchschnittlich sehr negativen Umweltwirkungen im Einzelfall ohne weiteres geringere Umweltwirkungen haben als eine „schlechte Anlage“, basierend auf einer Technologie, der typischerweise nur geringe negative Umweltwirkungen attestiert werden.

Aufgrund der Bedeutung, welche die Autoren insbesondere dem letztgenannten Faktor, dem „Ausschöpfungsgrad“ einer Technologie, zumessen, wird dieser Effekt im Hinblick auf die Gesamtbeurteilung einer Technologie – nicht nur aus Umweltsicht – in Kapitel 6.2 noch eingehender betrachtet.

Details: Beurteilungsblatt Technologien

Basis der obigen Wirkungsmatrix bildet die Beurteilung der einzelnen Technologien in den Beurteilungsblättern. Ein solches Blatt wurde für jede der neun Technologietypen (vgl. Tabelle 4) erstellt. Die Beurteilungsblätter sind nach einem einheitlichen Raster mit den folgenden Rubriken gegliedert:

- Kopf des Beurteilungsblatts mit Technologie/Varianten, Version/Datum und Name Autor,
- Zusammenfassung der wichtigsten Umweltwirkungen: Semiquantitative Beurteilung der Gesamtumweltwirkungen bei verstärktem Einsatz der Technologievariante im Rahmen der Energiestrategie 2050, inkl. summarische Darstellung in Form einer Farbcode-Tabelle,
- Begründung: Argumente und Annahmen für die Beurteilung der Umweltwirkungen,
- Ausgangslage und Bedeutung der Technologie,
- Aussichten, zukünftige Entwicklungspotenziale,
- Chancen und Risiken der Technologie: Darstellung und qualitative Beurteilung der Risiken und Chancen,
- Darstellung der Handlungsansätze und potenziellen Instrumente zur Minimierung der Umweltauswirkungen der Einzelanlagen und des technologiespezifischen Gesamtsystems.
- Auflistung weiterer wichtiger Aspekte und Begleitdokumente, insbesondere Zusammenstellung der relevanten Literatur und Informationsquellen zu den Umweltauswirkungen der Technologie.

Die Beurteilungsblätter finden sich in Anhang E.

5.2 Zusammenfassende Beurteilung der Technologien aus Umweltsicht

Die Gesamtbeurteilung soll aufzeigen, welche der einzelnen Technologien aus Umweltsicht am positivsten sind, welche keine relevanten oder nur schwach negative Umweltwirkungen haben, und auch welche aus Umweltsicht besonders problematisch sind. Es sollen zudem Aussagen gemacht werden, welche Technologievarianten eines bestimmten Technologietyps sich durch besonders geringe oder auffallend hohe Umweltwirkungen auszeichnen. Zudem sollen besonders hervorstechende Eigenheiten einer Technologie herauskristallisiert werden.

Wasserkraftwerke

Die Wasserkraft zeichnet sich dadurch aus, dass sie die Umwelt vorwiegend in Bezug auf Naturräume/Artenvielfalt belastet. Sie beinhaltet hingegen kaum negative Auswirkungen bzgl. Schadstoffen, Lärm oder NIS.

Betrachtet man *Neubauten* von Wasserkraftwerken an Fließgewässern über den Lebenszyklus, weisen diese in der Regel stark negative Auswirkungen auf die Biodiversität und die landschaftliche Vielfalt aus. Die Umweltverträglichkeit hängt jedoch massgebend vom gewählten Standort, dem Anlagekonzept und den Massnahmen zur Reduktion der negativen Wirkungen ab. Durch die Optimierung bestehender Anlagen in Kombination mit der ökologischen und landschaftlichen Sanierung besteht die Möglichkeit, sowohl die Energieproduktion zu steigern wie auch die Beeinträchtigung von Landschaft und Biodiversität zu verringern.

Die einzelnen Technologievarianten lassen sich wie folgt differenzieren:

- Laufwasserkraftwerke können negativ auf die Biodiversität und die landschaftliche Vielfalt wirken, indem sie das Flusskontinuum unterbrechen, den freien Flusslauf und den Geschiebehaushalts beeinträchtigen und unnatürliche Wasserspiegelschwankungen verursachen. Das Ausmass der Auswirkungen hängt stark von Typ, Technologie und Grösse der Anlage sowie vom Standort und den getroffenen Massnahmen zum Schutz der Biodiversität und der Landschaft ab. Aus Umweltsicht schneiden die Laufwasserkraftwerke etwas besser ab als die übrigen untersuchten Wasserkraftwerke, die Potenziale für den Neubau solcher Anlagen an ökologisch günstigen Standorten sind jedoch sehr beschränkt. Für die mittleren und grossen Laufwasserkraftwerke sind sie praktisch ausgeschöpft, da die geeigneten Flüsse und Standorte weitgehend verbaut sind.
- Bei Kleinwasserkraftwerken ist die Umweltverträglichkeit sehr standortspezifisch. Sie haben in der Regel jedoch stark negative Auswirkungen auf die Biodiversität und die landschaftliche Vielfalt.
- Speicher- und Pumpspeicherkraftwerke haben im Normalfall stark negative Auswirkungen auf die Biodiversität und die landschaftliche Vielfalt.

- Mittlere und grosse Wasserkraftwerke sind die einzigen der analysierten Technologien, die sich durch eine Reduktion der Risiken auszeichnen. Die Reduktion des Hochwasserrisikos durch Bauwerke, die den Wasserablauf regulieren können, hat ein reduziertes Risiko von Naturgefahren zur Folge.

Umbauten (Sanierung, Erneuerung) und *Aus- bzw. Erweiterungsbauten* (z.B. zwecks Erhöhung der Effizienz, der Leistung oder der Speicherkapazität) bestehender Gross- und Kleinwasserkraftwerke haben vergleichsweise geringe zusätzliche Umweltwirkungen. Einerseits ist der Eingriff in die Natur bereits erfolgt, andererseits können die Bauten mit einer ökologischen und landschaftlichen Sanierung einhergehen. Ebenso sind an bestehende Infrastrukturen gebundene Wasserkraftwerke (Trinkwasserkraftwerke, Abwasserkraftwerke, Doltierwasserkraftwerke, Bewässerungsanlagen etc.) aus gewässerökologischer Sicht in der Regel unbedenklich.

Windkraftwerke

Windkraftanlagen haben in vielen Fällen stark negative Auswirkungen auf die landschaftliche Vielfalt. Diese sind bei Grossanlagen und Windparks zwar proportional (pro erzeugte kWh) geringer als bei Kleinanlagen, aber dennoch gross. Zudem haben Windkraftanlagen je nach Standort schwache bis starke negative Auswirkungen auf die Biodiversität sowie in Bezug auf Lärm; im Durchschnitt werden sie als schwach negativ eingeschätzt. In erster Grössenordnung werden grosse und kleine Windkraftanlagen sowie Windparks (> 3 Anlagen am selben Standort) hinsichtlich ihrer Umweltwirkungen als etwa gleich beurteilt.

Bei der Windkraft ist die Meinung der Experten nicht so einhellig:

- Gemäss Haltung BAFU sind die Umweltwirkungen von kleinen Windkraftanlagen (<250 kWel) absolut gesehen tendenziell geringer als diejenigen von grossen Windanlagen (>250 kWel) und/oder von Windparks (mit mehr als drei Windturbinen).
- Die Windszene Schweiz (z.B. suisse éole) beurteilt die Umweltwirkungen jedoch in Relation zur produzierten Energie. Auf dieser Basis schneiden die grossen Windkraftanlagen und Windparks im Normalfall besser ab als die kleinen Windkraftanlagen.

Solarenergieanlagen

Die Umweltwirkungen der solarthermischen und der photovoltaischen Anlagen in Bezug auf Naturräume/Artenvielfalt unterscheiden sich zwischen den Varianten dieser Technologie beträchtlich:

- Solarthermische und gebäudebezogene PV-Anlagen haben keine oder nur schwach negative Umweltwirkungen, sofern dem Ortsbild- und Denkmalschutz Rechnung getragen wird. Damit schneiden aus Umweltsicht deutlich besser ab als Freiflächen-Photovoltaikanlagen.

- Freiflächen-Photovoltaikanlagen weisen im Normalfall eine stark negative Auswirkung infolge der gegenüber gebäudebezogenen PV-Anlagen erhöhten Beeinträchtigung der landschaftlichen Vielfalt und Flächennutzung aus. Zusätzlich haben sie schwach negative Auswirkungen auf die Biodiversität, namentlich indirekt in Konkurrenz zu anderen Flächennutzungen.

Bei allen Varianten der Solarenergieanlagen belasten THG- und Schadstoffemissionen während den Phasen Herstellung, Realisierung und Stilllegung/Entsorgung die Umwelt.

Biomasseanlagen

Das auffälligste Merkmal aller Biogasanlagen sowie der Holzheizkraftwerke sind die positiven Umweltwirkungen in Bezug auf die THG-Emissionen und den Verbrauch fossiler Brennstoffe (Reduktion der Emissionen bzw. des Verbrauchs).

Die rührt daher, dass wir bei Energieerzeugungsanlagen, die nebst Elektrizität auch Wärme generieren (z.B. Biogasanlage, Holzheizkraftwerk, Geothermieanlage), mit dem Status Quo als Referenz, den heutigen Wärmebedarf (für die Heizung von Gebäuden) in der Umgebung einer neuen Energieerzeugungsanlage berücksichtigen. Dabei gehen wir davon aus, dass diese Wärme heute auf fossiler Basis generiert wird. Damit wird jeder Wärmerzeugungsanlage auf der Basis erneuerbarer Energien, insbesondere auch den Biomasseanlagen, ein Potenzial zur Reduktion von Treibhausgasemissionen sowie des Verbrauchs fossiler Energieträger attestiert.

Nebst dieser Gemeinsamkeit gibt es für die einzelnen Varianten aber auch unterschiedliche Umweltwirkungen:

- Landwirtschaftliche Biogasanlagen können Methan-Emissionen reduzieren, falls als Referenz die Emissionen des ohnehin anfallenden Hofdüngers angesetzt werden (für detaillierte Erläuterung siehe Beurteilungsblatt in Anhang E). Daraus resultiert eine positive Umweltwirkung in Bezug auf das Klima. Industriell/gewerblichen Biogasanlagen können diese Methan-Minderemissionen nicht angerechnet werden
- Landwirtschaftliche sowie industriell/gewerbliche Biogasanlagen haben im Vergleich zu anderen Energieerzeugungsanlagen auf der Basis erneuerbarer Energie sehr hohe Schadstoffemissionen. Diese beruhen auf einem erhöhter Ammoniakgehalt der vergärten Gülle, hohen NO_x-Emissionen (aus der Verbrennung bei Wärme – oder Stromproduktion) sowie Lachgas.
- Die Holzheizkraftwerke haben als einzige der betrachteten Technologien positive Umweltwirkungen in Bezug auf die Biodiversität. Durch die Bewirtschaftung der Wälder zwecks effizienter Energieholznutzung werden seltene Habitate gepflegt und lichtere Wälder geschaffen, was sich in der Regel positiv auf die biologische Vielfalt auswirkt. Aufgrund der heu-

te sehr strengen Luftreinhaltevorschriften (de facto Filterpflicht, Rauchgasreinigungsanlagen) liegen die Schadstoffemissionen deutlich tiefer als die der Biogasanlagen und werden gesamthaft als vernachlässigbar beurteilt.

Geothermieranlagen

Geothermieranlagen haben nur schwach positive und schwach negative Umweltwirkungen. Wie die anderen Wärmeerzeugungsanlagen auf der Basis erneuerbarer Energien zeichnen sie sich durch positive Umweltwirkungen in Bezug auf die THG-Emissionen und den Verbrauch fossiler Brennstoffe aus (Erläuterung siehe unter Biomasseanlagen). Da Geothermieranlagen im Betrieb keine Verbrennungsprozesse beinhalten wirkt sich die potenzielle Reduktion des Verbrauchs fossiler Brennstoffe auch positiv auf die Luftschadstoffemissionen aus.

Für stimulierte geothermische Systeme besteht ein Risiko von Erschütterungen und Beben bei Stimulation des Untergrundes in der Realisierungs-/Bauphase. Das Risiko für Naturgefahren ist allerdings stark standortabhängig und liegt unterhalb der Schwelle für schwere gesellschaftliche Schäden. Es wird daher nur als leicht negativ beurteilt.

Kehrichtverbrennungsanlagen

Die KVA haben, falls sie methodisch so wie im Rahmen dieses Projekts behandelt werden², als einzige Technologie überhaupt keine negativen, sondern nur positive Umweltauswirkungen.

Die positiven Umweltwirkungen dank der Reduktion der THG-Emissionen gegenüber der fossilen Referenz (siehe Biomasseanlagen) werden für die KVA (erneuerbarer Anteil der Stromproduktion: derzeit 50%, Tendenz fallend) deshalb als stark beurteilt, da die Reduktion in der Betriebsphase aufgrund der speziellen Methodik nicht wie bei den anderen erneuerbaren Wärmeerzeugungsanlagen durch die Wirkung der THG-Emissionen in der Bauphase teilweise kompensiert wird.

² Die KVA bilden im Rahmen dieses Projekts einen Sonderfall. Erstens haben sie in der Schweiz primär die Funktion einer Abfallentsorgungsanlage, wobei die Nutzung der bei der Verbrennung frei werdenden Energie in Form von Wärme und Strom zunehmend wichtiger wird. Infolge des Entsorgungsauftrags können die KVA ihre CO₂-Emissionen nur bedingt durch die Reduktion der verbrannten Abfallmenge steuern (z.B. durch vermehrte Aufbereitung von Abfällen (u.a. Kunststoffe), Reduktion von Abfallimporten), zudem emittieren sie Treibhausgase, ob Wärme und/oder Strom genutzt wird oder nicht. Zweitens kann davon ausgegangen werden, dass in absehbarer Zeit in der Schweiz nur vereinzelte zusätzliche KVA gebaut werden. Bei der Beurteilung der Umweltwirkungen der Energienutzung aus KVA geht es daher sinnvollerweise nicht um eine komplett neue KVA, sondern vielmehr um die Ausstattung der wenigen noch nicht stromproduzierenden KVA der Schweiz mit einem Stromerzeugungssystem und/oder die Nutzung der ohnehin anfallenden Wärme aber allenfalls noch nicht vollumfänglich genutzten via Einspeisung in ein Fernwärmenetz. Im Rahmen dieser Umweltanalyse werden für die KVA daher nur die aufgrund der Energie-(Strom- und Wärme-) Nutzung entstehenden zusätzlichen Umweltwirkungen im Vergleich zu den Umweltwirkungen einer hypothetischen KVA ohne Wärmenutzung und Stromproduktion/-Nutzung (Referenz) beurteilt. Diese Methodik wurde auch in der Studie zur Ermittlung einer Ökobilanz (BUWAL/AWEL 2005) benutzt, die der Nutzung der Energie aus KVA eine ausgezeichnete Ökobilanz zuschreibt.

Fossile Energiesysteme

WKK-Anlagen und GuD-Kraftwerke auf fossiler Basis zeichnen sich selbstredend durch einen vergleichsweise hohen Verbrauch an fossilen Brennstoffen sowie hohe Emissionen von THG und Schadstoffen aus. Im Gegensatz zu den Emissionen der ERN-Anlagen fallen die Emissionen natürlich nicht primär beim Bau, sondern schwergewichtig beim Betrieb dieser Anlagen an. Daneben gibt es geringe Unterschiede:

- WKK-Anlagen: Falls davon ausgegangen wird, dass fossile Stromerzeugungsanlagen wegen der gesetzlich geforderten Wärmenutzung in bzw. am Rande von Siedlungsgebieten oder Industriezonen realisierte würden, werden die Umweltwirkungen im Bereich der Naturräume und der Artenvielfalt im Vergleich zu den anderen betrachteten Technologien als vernachlässigbar betrachtet. Dasselbe gilt für den Lärm. Dieser wird sowohl im Bau wie auch im Betrieb als vernachlässigbar beurteilt. Grund dafür ist die Einstufung von WKK-Anlagen als Industrieanlagen (obwohl es WKK-Anlagen auch in Ein- und Mehrfamilienhäusern gibt), welche nur in den entsprechenden Bauzonen, in denen höhere Lärmwerte zulässig sind, realisiert und betrieben werden können.
- GuD-Kraftwerke sind in der Regel Grossanlagen und können daher kaum auf bestehenden Industriezonen oder gar in bestehenden Gebäuden untergebracht werden. Damit haben GuD-Anlagen einen als schwach negativ beurteilten Flächenverbrauch. Die Wirkung der massiven Gebäudestrukturen (v.a. Kühltürme) auf die landschaftliche Vielfalt hängt stark vom Standort und dem Anlagendesign ab, sie wird für ein typisches GuD-Kraftwerk als schwach negativ bewertet. Anders als bei WKK-Anlagen wird die Wirkung von GuD-Kraftwerken in Bezug auf Lärm aufgrund des in der Regel intensiveren und längeren Baulärms in der Realisierungsphase ebenfalls als leicht negativ beurteilt.

Elektrische- und Gasnetze

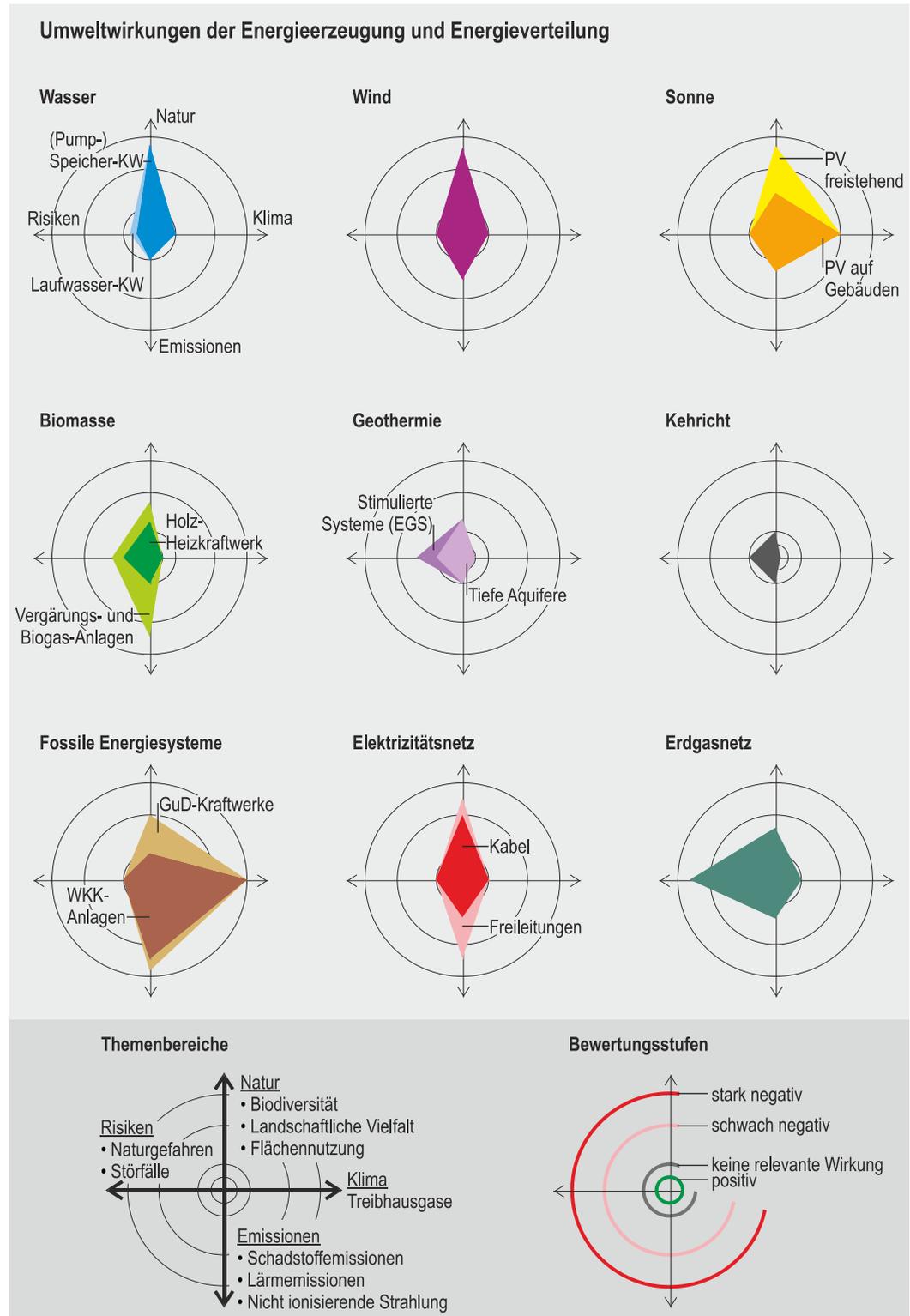
Netze für den Transfer von Elektrizität oder Gas haben in der Regel viele schwache und einige stark negative Umweltwirkungen zur Folge. Diese liegen für beide Arten von Netzen mehrheitlich im Bereich der Naturräume und der Artenvielfalt. Unterschiede bei den Umweltwirkungen zeigen sich in den folgenden Bereichen:

- Die elektrischen Hoch- und Höchstspannungs-Freileitungen haben eine stark negative Wirkung auf die landschaftliche Vielfalt. Problematisch sind Freileitungen besonders, wenn sie durch ökologisch sensible Gebiete (z.B. Schutzgebiete oder Biotope) führen, oder wenn für den Bau grössere Landwirtschafts- und/oder Waldflächen gerodet werden müssen. Sie erzeugen zudem nicht ionisierende Strahlungen (NIS), welche als stark negativ bewertet werden. Freileitungen, vor allem die mit einer Nennspannung ab 220 kV betriebenen Stränge, verursachen bei feuchtem Wetter zudem Koronalärm.

- Den unterirdisch verlegten elektrischen Hoch- und Höchstspannungsleitungen (Kabel) wird eine geringere Beeinträchtigung der landschaftlichen Vielfalt attestiert. Die Auswirkungen der Wärmeentwicklung von unterirdischen Leitungen auf die Bodenbiodiversität sind noch zu wenig bekannt. Im Vergleich zu den Freileitungen machen unterirdische Kabel zudem keinen Lärm und die Ausbreitung von NIS im Boden ist wesentlich geringer. Boden, Grundwasser und Oberflächengewässer werden durch den Bau und Betrieb eines erdverlegten Kabels jedoch stärker beeinträchtigt als durch eine Freileitung (in der Wirkungsmatrix nicht abgebildet).
- Gasnetze haben nur schwache Umweltwirkungen im Bereich der landschaftlichen Vielfalt und der Flächennutzung. Gasnetze sind die einzige der betrachteten Technologien, für die das Störfallrisiko bzw. dessen mögliche Folgen als sehr hoch beurteilt wird. Im Erdreich verlegte Gasleitungen können (insbesondere beim Bau) Böden negativ beeinflussen (z. B. Verdichtung, Beeinträchtigung des Grundwassers; in der Wirkungsmatrix nicht abgebildet). Problematisch ist insbesondere die Neuverlegung einer Gasleitung durch ökologisch sensible Gebiete, z.B. Schutzgebiete oder Biotope.

Figur 2 zeigt eine aggregierte grafische Darstellung der obigen Beurteilung der einzelnen Technologien in Form von Spiderdiagrammen.

Figur 2 Umweltwirkungen der betrachteten Technologien auf die vier Umwelthauptkriterien Naturräume/Artenvielfalt (Nord-Achse nach oben), Klima (nach rechts) Schadstoffe/Lärm/NIS (nach unten) und Risiken (nach links). Haben die einzelnen Technologievarianten unterschiedliche Wirkungen, wird dies durch unterschiedliche Intensitäten der farbigen Vierecke abgebildet. Der äusserste Kreis in den einzelnen Teilfiguren stellt eine stark negative Umweltwirkung dar, der zweit-äusserste eine schwach negative Umweltwirkung. Der zweitinnerste Kreis stellt die Nulllinie dar, der innerste positive Umweltwirkungen. Damit können positive und negative Umweltwirkungen abgebildet werden (Lesebeispiele auf der folgenden Seite).



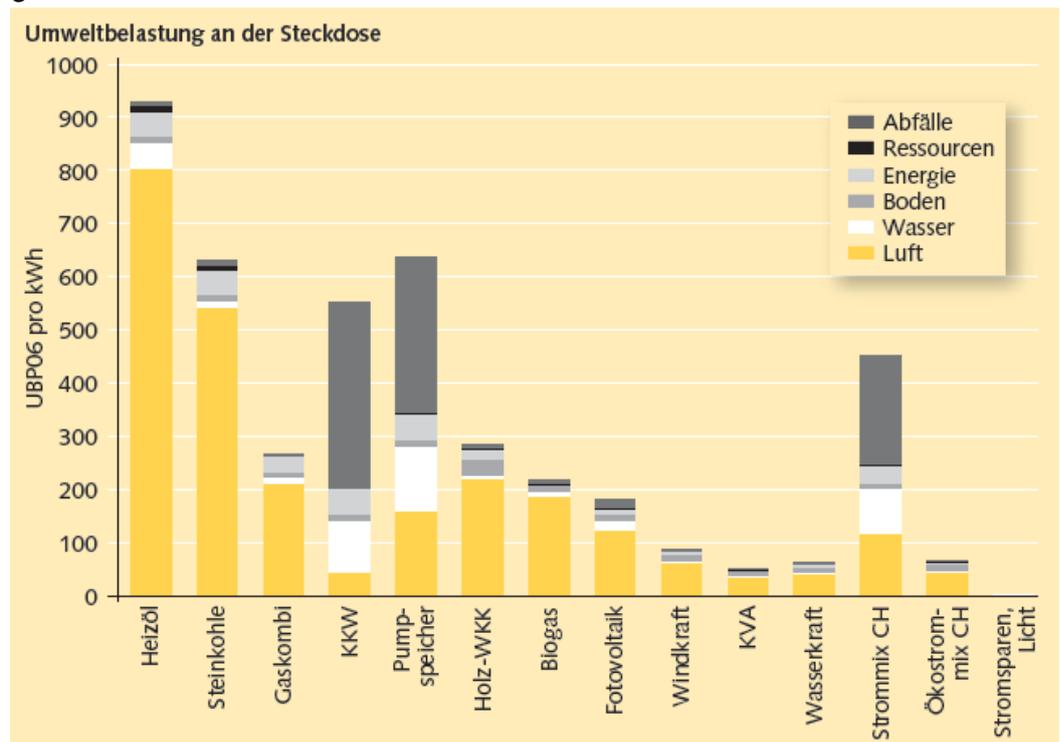
Zwei Lesebeispiele zur Interpretation von Figur 2:

- Windkraftwerke haben stark negative Umweltwirkungen in der Umwelthauptkategorie „Natur“ (Biodiversität, landschaftliche Vielfalt, Flächennutzung) sowie schwach negative Wirkungen in Bezug auf Emissionen (Lärm). Sie haben jedoch weder eine relevante Wirkung in Bezug auf das Klima (nur TGH-Emission beim Bau), noch in Bezug auf die Risiken (Naturgefahren, Störfälle).
- Fossile WKK-Anlagen haben demgegenüber keine Umweltwirkungen in der Hauptkategorie Naturräume/Artenvielfalt und beinhalten keine relevanten Risiken, weisen aber stark negative Wirkungen in Bezug auf das Klima (THG-Emissionen und Verbrauch fossiler Energieträger) sowie in Bezug auf die Schadstoffemissionen aus.

5.3 Quervergleich anhand von verfügbaren Ökobilanzen

Um die im Rahmen dieses Projekts vorgenommene Beurteilung der Umweltwirkungen von Technologien zur Stromerzeugung einem Quervergleich zu unterziehen, werden in diesem Abschnitt die Ergebnisse einer davon unabhängigen Untersuchung der Ökobilanz verschiedener Kraftwerkstypen (Frischknecht 2010) zusammenfassend dargestellt. Diese Studie hat die Umweltwirkungen von ausgewählten, im Jahr 2010 serienmässig verfügbaren Technologien auf der Basis erneuerbarer und nicht erneuerbarer Energie anhand der Methode der ökologischen Knappheit 2006 quantifiziert und verglichen.

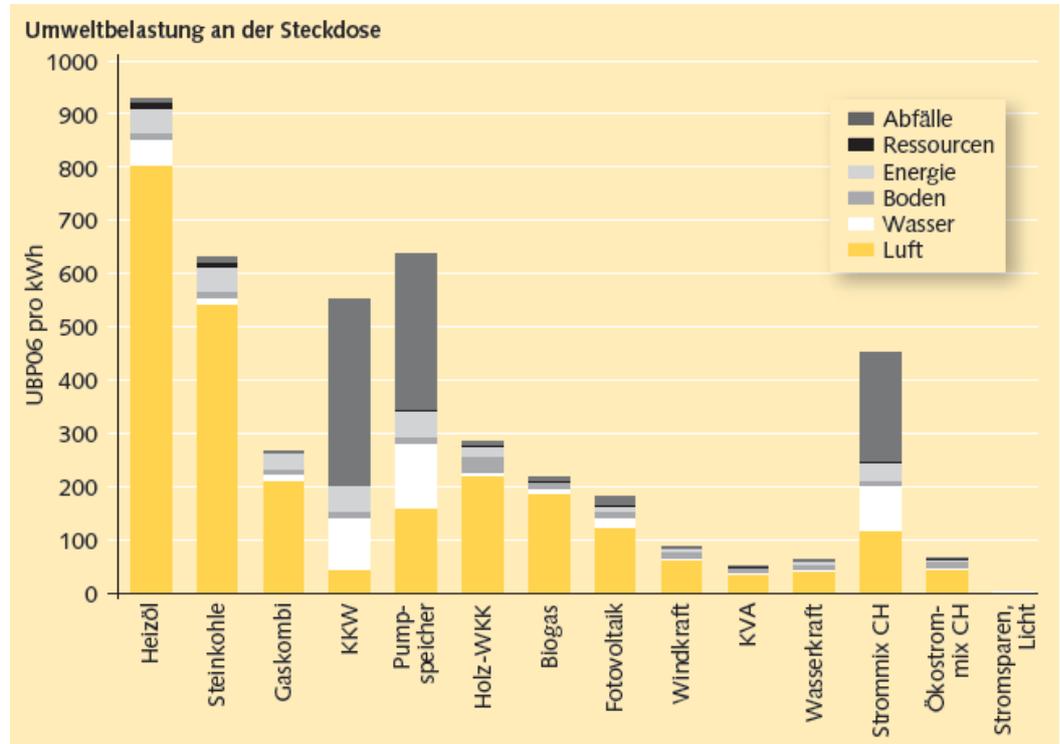
Figur 3



zeigt das Resultat: Die Gesamtumweltauswirkungen der analysierten Technolo-

gien (Umweltbelastung an der Steckdose), ausgedrückt in Umweltbelastungspunkten (UBP06).³

Figur 3 Umweltbelastung in UBPO6 verschiedener Technologien.



Erwartungsgemäss zeigen sich auch anhand dieser quantitativen Ökobilanzierung auf der Basis von UBPO6 sehr grosse Unterschiede in der Beurteilung der betrachteten Technologien. Ein grober, visueller Vergleich zwischen den Relationen der Umweltbelastungen der einzelnen Technologien gemäss UBPO6 einerseits, und den Relationen der Umweltwirkungen der Technologien gemäss dieser Beurteilung zeigt grösstenteils eine starke Übereinstimmung:

- Die tiefste Umweltbelastung weist die KVA aus.
- Ebenfalls tiefe Umweltbelastungen zeigen die Wasserkraft und die Windkraft. Leider liegt für die Wasserkraftanlagen keine explizite Beurteilung der Speicherkraftwerke vor.

³ Die Methode der ökologischen Knappheit gewichtet in einer Ökobilanz verschiedene Umweltwirkungen - Schadstoffemissionen und Ressourcenverbrauch - mittels so genannter Ökofaktoren. Der Ökofaktor eines Stoffes leitet sich aus der Umweltgesetzgebung oder entsprechenden politischen Zielen ab. Je mehr die aktuellen Emissionen resp. der Verbrauch an Ressourcen das gesetzte Umweltschutz-Ziel überschreiten, desto grösser wird der Ökofaktor, ausgedrückt in Umweltbelastungspunkten (UBP). Die Ökobilanzbewertungsmethode der ökologischen Knappheit wurde im Jahr 2008 für die Schweiz aktualisiert (Version UBPO6). Der Kriteriensatz zur Bewertung der Umweltwirkungen gemäss UBPO6 weicht wesentlich von dem in der vorliegenden Umweltanalyse verwendeten Satz von Umweltkriterien ab (Beispiele: UBPO6 ohne Biodiversität und landschaftliche Vielfalt, unterschiedliche Handhabung des Pumpstroms etc.)

- Die Pumpspeicherwerke schneiden sowohl gegenüber den Laufkraftwerken wie auch gegenüber den anderen ERN-Technologien weitaus schlechter ab.
- GuD-Kombikraftwerke weisen gegenüber den oben genannten Technologien deutlich höhere negative Umweltwirkungen aus. Diese beruhen auch nach UBP06 vorwiegend aus den Emissionen in die Luft (THG, Schadstoffe).
- Auch bei den Biogasanlagen dominieren nach UBP06 wie in der vorliegenden Beurteilung die Emissionen in die Luft.

Andererseits zeigen sich auch auffallende Unterschiede in der Bewertung:

- Die PV-Anlagen schneiden deutlich schlechter ab als in der vorliegenden Beurteilung. Bei der Ökobilanz ist allerdings unklar, ob und wie die Freiflächenanlagen in die Bewertung nach UBP06 eingehen. Zudem dürfte die landschaftliche Vielfalt und die Biodiversität, bei der die gebäudebezogenen PV-Anlagen in unsere Beurteilung gegenüber den Wasserkraft- und Windkraftanlagen viel Boden gutmachen können, in dieser Ökobilanzierung schwächer oder gar nicht gewichtet sein.
- Die Holzheizkraftwerke weisen noch höhere Emission in die Luft aus als die Biogasanlagen oder die GuD-Kraftwerke und schneiden damit in der Gesamtbetrachtung gemäss UBP06 noch schlechter ab als diese. Das BAFU ist der Ansicht, dass die hohen Schadstoffemissionen die in der Ökobilanz den Holzheizkraftwerken angelastet werden, bei den heutigen „State-of-the-Art“-Anlagen, nicht mehr gerechtfertigt sind. Aufgrund der heute sehr strengen Luftreinhaltevorschriften (de facto Filterpflicht, Rauchgasreinigungsanlagen) liegen die Schadstoffemissionen deutlich tiefer als die der Biogasanlagen.

6 ZUSATZKRITERIEN FÜR DIE GESAMTBEURTEILUNG DER TECHNOLOGIEN

Für die Gesamtbeurteilung der untersuchten Technologien und die Folgerungen, welche Technologien unter Mitberücksichtigung der Umweltauswirkungen am stärksten gefördert werden sollten, reichen die bisherigen Betrachtungen im Rahmen der Umweltanalyse (und auch quantitative Ökobilanzierungen) nicht aus. Um sich ein Gesamturteil bilden zu können, bedarf es zusätzlicher Kriterien. Als weitere relevante Kriterien nebst der Umweltwirkung erachten die Autoren dieses Berichts insbesondere die folgenden:

- Funktionsfähigkeit/Versorgungssicherheit: Welche Funktion und Bedeutung hat eine Technologie als Komponente der Schweizer Stromversorgung? Ist sie austauschbar durch eine andere? Ist sie Voraussetzung für die Realisierung anderer Technologien?
- Ausschöpfungsgrad einer Technologie: Wie ausgereizt sind die Potenziale? Gibt es weitere geeignete Standorte? Dieses Kriterium ist auf der Zeitachse differenziert zu betrachten.
- Verhältnis Nutzen zu Umweltwirkungen: Mit welchen Technologien kann bei vertretbarer Umweltwirkung ein energetisch relativ grosses Restpotenzial erschlossen werden?

6.1 Funktion und Bedeutung einer Technologie

Die bis anhin unabhängig voneinander betrachteten Technologien können aus der Sicht des Energieversorgungssystems Schweiz bzw. der Sicherheit der Stromversorgung nicht als gleichwertig oder völlig austauschbar betrachtet werden. Je nach primärer Funktion der Technologie als Bestandteil der Stromversorgung kommt ihr eine unterschiedliche Bedeutung zu. Während einzelne ERN-Technologien zur Stromerzeugung bis zu einem gewissen Grad austauschbar sind, kann auf andere Technologien kaum verzichtet werden. Eine zentrale Bedeutung für die Funktionsfähigkeit der zukünftigen Stromversorgung haben:

- die elektrischen Netze, insbesondere die elektrischen Hoch- und Höchstspannungsleitungen zur Übertragung des Stroms von den Quellen zu den Verbraucherzentren,
- die Pumpspeicherkraftwerke (die heute und auch in absehbarer Zukunft weitaus bedeutendste Speichertechnologie), denen angesichts des geplanten Ausbaus der fluktuierenden erneuerbaren Technologien (Windkraft, PV-Anlagen) langfristig eine absolute Schlüsselrolle zukommt.

Die Gasnetze haben zwar ebenfalls eine wichtige Bedeutung für die Versorgung allfällig notwendiger zukünftiger GuD-Kraftwerke und gasbefeuerteter WKK-Anlagen. Anders als das Elektrizitätsnetz ist das Gasnetz inkl. Nebenanlagen jedoch schon heute gut dimensioniert und für den in Zukunft möglicherweise steigenden Gasverbrauch gerüstet, da der letzte Ausbau erst einige Jahre her ist. Zwischen 1993 und 2005 wurden die Transitgasleitungen zwecks Erhöhung der Transportkapazitäten erweitert. Weitere substantielle Ausbauten sind auch im Hinblick auf die neue Schweizer Energiepolitik mit dem Ausstieg aus der Kernenergie nicht geplant. Gemäss Swissgas AG reichen die Netzkapazitäten im Hochdruckbereich aus, um drei bis fünf grosse Gaskombikraftwerke zu betreiben (vgl. Beurteilungsblatt in Anhang E).

Im Weiteren sollte bei der Beurteilung der ERN-Technologien unterschieden werden, ob deren Stromproduktion fluktuierenden Charakter hat oder grundsätzlich regelbar ist. Je grösser der Anteil der fluktuierenden Technologien, umso schwieriger ist die Regelung des gesamten Stromversorgungssystems. Daher leisten regelbare Stromerzeugungsanlagen (z.B. biomassebasierte Anlagen) einen wichtigen Beitrag zur Stabilisierung des elektrischen Netzes.

6.2 Kennlinie der Umweltwirkung einer Technologie

6.2.1 Restpotenziale für die Stromerzeugung

Das UVEK hat mit den Grundlagen für die neue Energiestrategie des Bundes im Mai 2011 für die meisten der im vorliegenden Bericht betrachteten Technologien die technischen Potenziale⁴, die erwartete Nutzung im Jahr 2050 sowie den dafür erforderlichen (erwarteten) Zubau im Zeitraum 2009 bis 2050 publiziert. Um eine Vorstellung davon zu erhalten, wie weit das Potenzial zur Stromerzeugung auf der Basis einer bestimmten Technologie bereits ausgereizt ist, wurden diese Zahlen durch den effektiven Stand der Nutzung im Jahr 2010 sowie das verbleibende Restpotenzial bis 2050 ergänzt. Tabelle 9 zeigt das Ergebnis.

Tabelle 9 Potenziale, erwartete und effektive Nutzung und Restpotenziale für erneuerbare und fossile Stromerzeugungsanlagen (alle Angaben in TWh, Quellen: für Potenziale BFE 2011a, für Effektive Nutzung 2010 BFE 2011b)

Technologietyp	Technologievariante	Potenzial technisch	Erwartete Nutzung		Eff. genutzt 2010		Restpotenzial abs., bis 2050	Faktor erwartet/effekt.
			2050	davon Ausbau seit 2009	absolut	in %		
Wasserkraft	inkl. Ausbau Pumpsp'KW	47	45.2	10.1	35.1	78%	10.1	1.3
Windkraft		n.a.	4.0	4.0	0.0	1%	4.0	109
Solarenergie		15-18	10.4	10.4	0.1	1%	10.4	125
Biomasse	Biogasanlagen	2.3	1.4	1.4	0.1	6%	1.4	17
	Biomasseanlagen (Holz)	1.7	1.1	1.1	0.1	12%	1.1	8
Geothermie		n.a.	4.4	4.4	-	-	4.4	-
Kehrichtverbrennung	KVA (ERN-Anteil Stromprod.)	1.7	1.7	1.0	0.9	54%	1.0	2
Fossile Energiesysteme	fossile WKK-Anlagen	20-30	24.0	23.0	1.3	5%	23.0	19

⁴ Definition Potenziale (Quelle: Piot 2007): Mit dem theoretischen Potenzial wird das gesamte physikalisch nutzbare Energieangebot eines Energieträgers oder einer Energietechnik zu einem bestimmten Zeitpunkt innerhalb einer gegebenen Region bezeichnet. Derjenige Anteil, der unter Berücksichtigung der gegebenen technischen Einschränkungen nutzbar ist, ist das technische Potenzial.

Im Vergleich zu den genannten, langfristig erwarteten Nutzungspotenzialen für die Stromerzeugung ist die effektive heutige Nutzung für alle betrachteten Technologien mit Ausnahme der Wasserkraft und der KVA bescheiden: Sie liegen für die klare Mehrheit der Technologien im Bereich 0% bis 12%.

Die Technologien, welche die grössten Restpotenziale aufweisen, sind (in der Reihenfolge der absoluten Zahlen) die Solarenergie, die Geothermie und die Windkraft. Gemäss Stand der Potenzialschätzung 2011 wurden deren Potenziale im Jahr 2010 zu max. 1% genutzt.

Die Wasserkraftpotenziale in der Schweiz sind hingegen schon heute weitestgehend ausgenutzt. Dass der Steigerungsfaktor (Verhältnis von erwarteter Nutzung 2050 zu effektiver Nutzung 2010) immer noch bei 1.3 liegt, ist v.a. dadurch begründet, dass er den vorgesehenen Zubau gemäss neuer Energiestrategie von 5'000 GWh bei den Pumpspeicherwerken beinhaltet.

Die Stromproduktion in KVA kann gemäss BFE 2011a gegenüber der heutigen Nutzung noch knapp verdoppelt werden. Die Restpotenziale für den Ausbau der Biomasseanlagen wie auch der WKK-Anlagen liegen im mittleren Bereich. Deren Nutzung sollte langfristig noch um den Faktor 10 bis 20 gesteigert werden können.

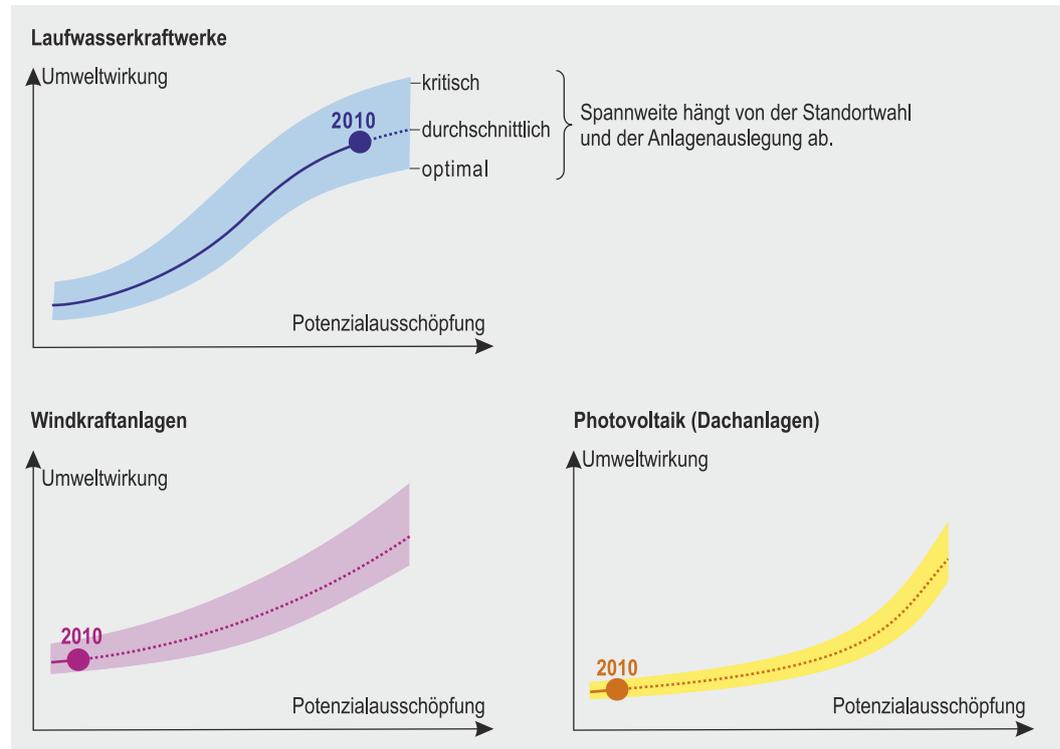
6.2.2 Ökologische Verträglichkeit und Umweltkennlinie einer Technologie

Die Zahlen zu den verbleibenden Restpotenzialen in Tabelle 9 sagen nichts über die ökologische Verträglichkeit aus. Eine aktuelle Nutzung, die im Bereich von weniger als 1% liegt, suggeriert, dass die Potenziale auch aus Umweltsicht noch lange nicht ausgeschöpft sind. Dem ist aber nicht so. Während die Nutzung einzelner Technologievarianten wie die gebäudebezogenen PV-Anlagen auch aus Sicht der Umwelt massiv gesteigert werden kann, ist der Ausbau der Windkraft viel vorsichtiger voranzutreiben, die Möglichkeiten für den Neubau weiterer Laufkraftwerke sind in der Schweiz nahezu erschöpft.

Auf der Basis der gemachten Umweltanalyse kann die Frage nach den Grenzen der Verträglichkeit für die einzelnen Technologien aus Sicht der Umwelt nicht beantwortet werden. In diesem Kapitel soll daher beispielhaft der Mechanismus illustriert werden, der nach Ansicht der Autoren einen sehr bedeutenden Einfluss auf die Umweltwirkung einer bestimmten Stromerzeugungsanlage hat.

Figur 4 zeigt diesen Mechanismus am Beispiel eines Vergleichs der Laufwasserkraft, der Windkraft und der Photovoltaik auf. Der Vergleich ist illustrativ zu verstehen. Es geht um die Veranschaulichung der Prinzipien, welche die effektiven Umweltwirkungen einer Technologie stark beeinflussen. Der effektive Verlauf der Umweltkennlinien entbehrt einer wissenschaftlichen Basis.

Figur 4 Unterschiedliche Kennlinien Umweltwirkung vs. Ausschöpfungsgrad, illustriert anhand den drei Technologien Wasserkraft, Windkraft und Photovoltaik (Gebäude). Nur indikative Darstellung zur Veranschaulichung der Prinzipien, welche die effektive Umweltwirkung einer Technologie stark beeinflussen.



Jede der oben dargestellten Kennlinien bildet eine Technologie mit typischen negativen Umweltwirkungen (auf der Y-Achse: klein, mittel, gross) ab. Auf der X-Achse ist der Ausschöpfungsgrad einer Technologie, d.h. das Verhältnis zwischen dem bis heute effektiv genutzten und dem nachhaltig realisierbaren Potenzial⁵ dargestellt. Gemäss Tabelle 9 sind die Potenziale der drei Technologien zu einem sehr unterschiedlichen Teil ausgeschöpft. Während das Potenzial der Wasserkraft in der Schweiz heute (ohne Berücksichtigung des Ausbaus von Pumpspeicherkraftwerken, welcher im Restpotenzial der Wasserkraft in Tabelle 9 mit eingerechnet wird) zu sicher über 80% ausgeschöpft ist, sind die Potenziale der Windkraft und der Photovoltaik heute zu weniger als 1% genutzt. Es ist zu beachten, dass diese Darstellung keine explizite Zeitachse enthält. Es gilt jedoch: Je mehr Anlagen gebaut werden, umso mehr wandert der Ausschöpfungsgrad nach rechts und damit die Umweltwirkung des neusten Standorts auf der steigenden Kennlinie nach oben. Die Grafik zeigt drei entscheidende Mechanismen:

- a) Tendenziell zunehmende Umweltwirkungen für neue Anlagen: Die Kennlinien steigen alle von links nach rechts an. Die ersten Standorte einer bestimmten Technologie (tiefer Ausschöpfungsgrad, linker Rand der Kennlinien) sollten bei richtiger Wahl diejenigen mit geringen Umweltwirkungen sein. Für später

⁵ Für Definition siehe Piot 2007.

gebaute Anlagen ist die Standortwahl beschränkt. Die letzte Anlage wird prinzipiell immer an einem ungünstigeren Standort mit stärker negativen Umweltwirkungen gebaut werden müssen. Ein gutes Beispiel zur Illustration dieses Mechanismus sind die grossen Laufwasserkraftwerke. Dafür gibt es in der Schweiz kaum noch günstige Standorte, diese sind schon seit Jahrzehnten verbaut. Neue Standorte liegen ganz am rechten Rand der Grafik und haben daher stärkere Umweltwirkungen. Demgegenüber gibt es noch Standorte für Windkraftanlagen (am linken Rand der Grafik), die geringere Umweltwirkungen haben, obwohl Windkraftwerke hinsichtlich der typischen Umweltwirkungen im Vergleich zu den Laufwasserkraftwerken als negativer beurteilt werden. Die PV-Anlagen haben vorderhand noch eine geringe Standortsensitivität. Es gibt noch jahrzehntelang genug Gebäudeflächen für PV-Anlagen mit geringen Umweltwirkungen.

- b) Jede Technologie hat eine eigenen Kennlinie: Gemäss der Analyse der Umweltwirkungen im Rahmen dieses Projekts sind die Umweltwirkungen von gebäudebezogenen PV-Anlagen noch über Jahrzehnte relativ klein. Die Umweltwirkungen der Windkraftanlagen sind im Vergleich dazu tendenziell etwas grösser, und die zukünftigen Anlagen bewegen sich entlang einer anders geformten Kennlinie. Diese ist in der Illustration steiler (Annahme), d.h. die Umweltwirkungen der neuen Anlagen werden schneller zunehmen.
- c) Bandbreite für Umweltwirkungen: Wie bereits in Kapitel 5.1 erwähnt, ist in der Praxis zu unterscheiden zwischen gut oder schlecht ausgelegten Anlagen an günstigen oder weniger günstigen Standorten. Zusätzlich zur Kennlinie für die typischen Anlagen (mittlere Linie) sind in der obigen Grafik daher auch Bandbreiten (farblich gekennzeichnet) für die Güte der Anlagen dargestellt. Die Illustration davon aus, dass die Bandbreite der Technologien unterschiedlich ist.

Fazit

Je stärker die Potenziale bzw. die guten Standorte für weitere Anlagen einer bestimmten Technologie ausgeschöpft sind, umso stärker werden sich tendenziell die negativen Umweltwirkungen bemerkbar machen. Wie steil die Kennlinie „Zunahme Umweltwirkungen vs. zusätzlich erschlossenes Potenzial“ verläuft, ist von der Technologie abhängig.

Zudem kann die gute Qualität der Standortwahl und des technischen Designs einer Anlage in der Praxis dazu führen, dass die effektiven Umweltwirkungen dieser Anlage weit geringer sind als diejenigen einer „schlecht konzipierten Anlage“, die aber auf einer Technologie basiert, der typischerweise nur schwach negative Umweltwirkungen attestiert werden.

7 FOLGERUNGEN UND EMPFEHLUNGEN

7.1 Ansatz zur Bildung des optimalen Technologieportfolios

Ziel dieser Studie ist es, die Grundlagen zu schaffen, um ein Portfolio von aus Umweltsicht günstigen Technologien entwickeln zu können. Dieses Kapitel skizziert einen Ansatz, wie dieses Portfolio gebildet werden kann. Zur Beurteilung der Technologien werden aufgrund der Überlegungen im vorhergehenden Kapitel jedoch nicht nur die Umweltkriterien im engeren Sinn herangezogen, sondern zusätzlich auch die Funktion und Bedeutung einer Technologie, die Relation Nutzen/Wirkung sowie – soweit abschätzbar – die Umweltkennlinie einer Technologie.

Infolge der Tatsache, dass die negativen Umweltwirkungen einer Technologie entlang der Zeitachse tendenziell zunehmen (Dynamik durch Umweltkennlinie abgebildet), wird die Beurteilung einer bestimmten Technologie davon abhängen, in welchem Zeitraum die Anlage gebaut wird. In der Beurteilung wird zwischen drei Zeiträumen unterscheiden: kurz- bis mittelfristig (2012 - ca. 2025), langfristig (2026 - 2035) und sehr langfristig (2036 - 2050). Da die Steilheit und Form der Umweltkennlinien der einzelnen Technologien nicht genau bekannt sind, kann jedoch die sich entlang der Zeitachse ändernde Beurteilung nur indikativen Charakter haben.

Das Ergebnis dieser umfassenderen Beurteilung der Technologien anhand der obigen Kriterien ist in Tabelle 10 dargestellt.

Tabelle 10 Portfolio bevorzugter Technologien unter Berücksichtigung der Umweltwirkungen, der funktionalen Bedeutung, der Nutzen-/Wirkungs-Relation und der Umweltkennlinie (Ausschöpfungsgrad) der Technologie. Lesebeispiele: 1) Neue Wasserkraftwerke an Fließgewässern haben in der Regel stark negative Umweltwirkungen. Zudem ist das nachhaltig nutzbare Potenzial weitgehend ausgeschöpft. 2) PV-Anlagen auf Gebäuden haben sehr geringe Umweltwirkungen, das Restpotenzial ist noch sehr gross, daher werden die Umweltwirkungen erst sehr langfristig zunehmen (wenn praktisch alle Gebäude genutzt sind).

Energiestrategie 2050 - Umweltanalyse und Bewertung der Technologien									
Technologien: Folgerungen, Empfehlungen betr. Ausbau									
	Nr.	Technologietyp	Technologievariante	Funktionale Sonderstellung	Restpotenz. Ausbau	Beurteilung Ausbau	Zusatzbemerkungen und Empfehlungen		
Anlagen zur Energieerzeugung									
Erneuerbare Energien	1	Wasserkraft	Kleinwasserkraft		gross > 10 TWh/a		Neubauten haben stark negative, Erweiterungsbauten relativ geringe zusätzliche negative Umweltwirkungen -> in erster Linie Ausbau		
			Laufkraftwerke					-> Verzicht auf Bau neuer KW, evtl. Erhöhg. Kapaz. bestehender KW	
			Speicherkraftwerke						
			Pumpspeicherkraftwerke	Strom-Speicher				Ausbau aus Umweltsicht schlecht, aber funktional notwendig	
		2	Windkraft	Kleinanlagen < 250 KW _{el}		mittel 4-6 TWh/a		Vorderhand gute Stao, vertretbare Umweltwirkungen, nehmen langfristig zu. Insgesamt mittleres Restpotenzial	
				Grossanlagen > 250 KW _{el}					-> Sorgfältige Standortwahl und Auslegung
				Windparks (>3 Anlagen)					
		3	Solarenergie	Solarthermische Produktion		gross >10 TWh/a		Grösstes Restpotenzial, bestes Verhältnis Nutzen zu Umweltwirkungen (bleiben noch lange tief) -> Ausbau forcieren	
				Photovoltaik gebäudebezogen					Schlechteste Variante -> nach Möglichkeit auf Ausbau verzichten
				Photovoltaik, Freiflächenanlagen					
		4	Biomasse	Industrielle/gewerbliche Vergärungsanlagen	(Regelbare Energieproduktion)	gering <3 TWh/a		Mit Ausnahme Schadstoffemissionen relativ geringe Umweltwirkungen, insgesamt eher geringes Restpotenzial -> vorderhand ausbauen, langfristig eher kritisch (spez. Verfügbarkeit Brennstoff?)	
				Landwirtschaftliche Biogasanlagen					
	Holz-Heizkraftwerk								
	5	Geothermie	Geotherm. Syst. zur Nutzung tiefer Aquifere	(Regelbare Energieproduktion)	mittel 4-6 TWh/a		Gutes Verhältnis Nutzen zu Umweltwirkungen, Technologieentwicklung braucht noch Zeit, Risiken? -> Ausbau forcieren		
			Stimulierte geothermische Systeme (EGS)						
	6	Kehrichtverbrennung	KVA (nur Stromproduktion)		gering <3 TWh/a		Bestes Verhältnis Nutzen zu Umweltwirkungen, jedoch nur noch geringes Restpotenzial -> Ausbauen bis Potenzial ausgeschöpft		
Fossile Energien	7	Fossile Energiesysteme	Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen (WKK)	(Regelbare Energieproduktion)	gross >10 TWh/a		Ausbau aus Umweltsicht schlecht -> Ausbau nur wenn unbedingt notwendig. Evtl. bessere Alternative: Stromimporte		
			GuD-Kraftwerke (Stromgeführt)						
Netze									
	8	Elektrizitätsnetz	Freileitungen	Strom-Übertragung			Ausbau aus Umweltsicht schlecht, aber funktional notwendig		
			Kabel	Strom-Übertragung					
	9	Gasnetz	Gasnetz				Stark negative Umweltwirkungen, Ausbau funktional nicht notwendig		
							geringe negative Umweltwirkungen, gute Standorte noch verfügbar -> Förderung/Ausbau dieser Technologie mit höchster Priorität		
							beste Standorte ausgeschöpft, daher etwas erhöhte, vertretbare Umweltwirkungen -> Förderung/Ausbau dieser Technologie mit hoher Priorität		
							stark negative Umweltwirkungen -> Auf Förderung/Ausbau dieser Technologie nach Möglichkeit verzichten		
							stark negative Umweltwirkungen, Technologie ist aber funktional für Erhalt Versorgungssicherheit notwendig -> auf Ausbau kann nicht verzichtet werden		
							Potenzial vermutlich ausgeschöpft		

7.2 Strategische Folgerungen für der Ausbau der erneuerbaren Energien

Aufgrund der Ergebnisse der Analyse der Umweltwirkungen (in Kapitel 5) sowie der technologieübergreifenden Überlegungen (in Kapitel 6) können vier strategische Folgerungen gezogen werden:

1. Jede der betrachteten Technologien (mit Ausnahme der KVA, bei der gewählten Methodik) hat gewisse negative Umweltwirkungen.
2. Die Umweltwirkungen einer Anlage werden nur zu einem Teil durch die eingesetzte Technologie per se bestimmt. Die Qualität der Standortwahl und die Auslegung der Anlage üben (bei gleicher Technologie) in der Regel einen ebenso grossen Einfluss auf die Umweltwirkungen aus.
3. Beim Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien kann nicht mechanistisch auf die aus Umweltsicht beste Technologie gesetzt werden, sondern es ist primär die Technologie zu fördern, deren Umweltkennlinie im Zeitpunkt der Wahl bzw. Realisierung am betrachteten Standort im Vergleich zu den anderen „tiefer liegt“.
4. Eine projekt- und standortspezifische Umweltanalyse ist bei jeder der betrachteten Technologien unerlässlich.

Ob eine bestimmte negative Umweltwirkung (z.B. Beeinträchtigung der Biodiversität oder der landschaftlichen Vielfalt) im Vergleich zu einer anderen (z.B. Treibhausgasemissionen, Lärm) als gravierender oder allenfalls eher akzeptabel spezifiziert wird, ist ein Entscheid, der nicht auf technokratische Art gefällt werden kann. Einzelfallbetrachtungen (unter standort- und projektspezifischen Aspekten) sind zwingend. Die Akzeptanz einer bestimmten Umweltwirkung basiert letzten Endes auf gesellschaftlichen Werten. Es kann davon ausgegangen werden, dass sich diese im Laufe der kommenden Jahrzehnte ändern werden.

7.3 Technologiespezifische Folgerungen und Empfehlungen

Die Aussagen und Empfehlungen in diesem Kapitel nehmen Bezug auf die Tabelle 10 im vorhergehenden Kapitel.

Wasserkraft

Aus Umweltsicht soll in erster Linie die Effizienz bestehender Anlagen gesteigert werden, dies wo immer möglich in Kombination mit einer ökologischen und landschaftlichen Sanierung. Eine Erhöhung der Energieproduktion wird sich daher in erster Linie durch Optimierungen des hydraulisch-mechanischen Teils (z.B. Effizienzsteigerungen durch den Ersatz von Turbinen oder Erhöhung der Fallhöhe durch Anpassungen an Stauwehr) erzielen lassen.

Ebenso sind an bestehende Infrastrukturen gebundene Anlagen zu fördern, da diese aus ökologischer und landschaftlicher Sicht meist unbedenklich sind. Erst in letzter Priorität sollen Neuanlagen realisiert werden, dies im Rahmen der

nachhaltig nutzbaren Potenziale, also mit grösstmöglicher Effizienz und lediglich an Standorten, an denen das Verhältnis zwischen energetischem Nutzen und den Kosten durch die ökologische und landschaftliche Beeinträchtigung optimiert werden kann. Dieses Verhältnis ist bei Kleinstanlagen in der Regel ungünstiger. Neubauten von Speicherkraftwerken haben stark negative Umweltwirkungen zur Folge. Auf diese sollte daher nach Möglichkeit verzichtet werden.

Der Ausbau von Pumpspeicherwerken hat noch etwas ausgeprägtere negative Umweltwirkungen. Auf die Pumpspeicherwerke kann jedoch wegen ihrer auch langfristigen Schlüsselrolle als Speicher im Schweizer Elektrizitätsnetz kaum verzichtet werden. Zur Förderung des Ausbaus erneuerbarer Energien und deren problemlose Integration in das Schweizer Elektrizitätsnetz wird ein Ausbau der Pumpspeicherkraftwerke unumgänglich sein.

Windkraft

Die Umweltwirkungen der kleinen (<250 kW) und der grossen (>250 kW) Windkraftanlagen und der Windparks (> 3 Anlagen an einem Standort) liegen etwa in der gleichen Grössenordnung.

Die in der Praxis resultierenden effektiven Umweltwirkungen in der Dimension Naturräume und Artenvielfalt sind in der Regel sehr stark vom gewählten Standort und der Auslegung abhängig. Solange der Ausschöpfungsgrad noch tief liegt, d.h. in den nächsten beiden Jahrzehnten, wird das Verhältnis von zusätzlicher Energieproduktion zu akzeptierten Umweltwirkungen als vertretbar betrachtet. Falls eine hohe Qualität von Standortwahl und technischen Konfliktlösungsmöglichkeiten sichergestellt werden kann, sollte die Windkraft unter den Technologien eingereiht werden, deren Ausbau bis auf weiteres grundsätzlich möglich ist.

Solarenergie

Sowohl die solarthermischen Anlagen wie auch die gebäude- oder anlagebezogenen PV-Anlagen zeichnen sich durch geringe Umweltwirkungen aus. Zudem ist das nachhaltig nutzbare Potenzial sehr gross. Bei der vorhergesagten weiteren Kostenreduktion werden die PV-Anlagen auf den verfügbaren Gebäudeflächen zu einer der Schlüsseltechnologien mit einer hervorragenden Relation von Nutzen zu Umweltwirkungen. Der Ausbau sollte daher stark forciert werden. Bei der Förderung ist darauf zu achten, dass voll in die Dachflächen oder Fassaden integrierte und möglichst grossflächige, d.h. das ganze Dach oder die ganze Fassade abdeckende PV-Anlagen am stärksten portiert werden.

Auf den Ausbau der Freiflächen-PV-Anlagen sollte angesichts der deutlich grösseren Umweltwirkungen und der Konkurrenz zu anderen Flächennutzungen verzichtet werden.

Biomasse

Das Restpotenzial der Biomasseanlagen liegt in der gleichen Grössenordnung wie dasjenige der Windkraft und ist damit deutlich kleiner als das der Photovol-

taik. Der Ausschöpfungsgrad liegt deutlich höher als bei PV und Wind. Die Biomasseanlagen haben aber im Hinblick auf den Ausbau der erneuerbaren Energien die vorteilhafte Eigenschaft, dass ihre Energieproduktion grundsätzlich regelbar ist.

Der Ausbau der Biomasseanlagen sollte in den kommenden Jahrzehnten ebenfalls gefördert werden. Dabei ist auf eine sorgfältige Standortwahl zu achten. Falls die Versorgung mit Brennstoff aus der Region kritisch erscheint, sollte jedoch auf die Realisierung von Biomasseanlagen verzichtet werden. Langfristig besteht ein relativ grosses Risiko der Verknappung sowohl von biogenen Abfällen wie auch von Holz (zunehmende Konkurrenz unter den Biomasseanlagen um regional verfügbare Brennstoffe). Lange Transportwege der Brennstoffe mit relativ hohen Sekundäremissionen würden die vertretbaren Umweltwirkungen der Biomasseanlagen zunichtemachen.

Geothermie

Das Potenzial wird heute noch nicht genutzt, das Restpotenzial liegt im mittleren Bereich.

Im Vergleich z.B. zur Photovoltaik ist die Technologieentwicklung jedoch noch klar im Rückstand. Eine Reihe von Prognosen muss zuerst noch erhärtet werden. Dazu zählen insbesondere die in der Praxis erschliessbaren Potenziale (auf dem relativ hohen Temperaturniveau, das es zur Stromerzeugung braucht), das Risiko bei der Realisierung von stimulierten geothermischen Systemen und der Grad der erwarteten Kostendegression.

Der Ausbau der Geothermieanlagen sollte ebenfalls forciert werden. Dank des relativ hohen Verhältnisses von Nutzen zu Umweltwirkungen sollten die Klärung obiger Fragen und schliesslich die Nutzung der Geothermie rasch vorangetrieben werden.

KVA

Die Optimierung und Nachrüstung von KVA mit Stromerzeugungssystemen, welche die Stromproduktion der KVA erhöhen sowie die Einspeisung allenfalls noch nicht genutzter Wärme in ein Fernwärmenetz wird daher aus Umweltsicht grundsätzlich sehr befürwortet. Das Stromerzeugungspotenzial der KVA sollte mit erster Priorität so weit wie sinnvoll ausgereizt werden. Da die Verbrennung von Abfällen in KVA der aus ökologischer Sicht anzustrebenden Schliessung der Stoffkreisläufe entgegenläuft sollten jedoch keine neuen KVA gebaut werden.

Daher ist das verbleibende Potenzial relativ klein. Zudem ist die gesamtheitliche Optimierung der energetischen Nutzung von Wärme und Strom aus KVA ein sehr komplexer Prozess, dessen Ergebnis sehr stark von den einzelnen KVA, insbesondere deren Standort und Umgebung (Wärmenutzungspotenziale) abhängt. In einzelnen Fällen könnte es kurzfristig sinnvoller sein, die Wärmenutzung der KVA zu optimieren und auf den Ausbau des Stromproduktionsanteils zu verzichten. Langfristig kann jedoch damit gerechnet werden, dass der Wär-

mebedarf der am Wärmenetz angeschlossenen Nutzer zurückgeht und es damit interessanter wird, die Stromproduktion auszubauen, um nicht Gefahr zu laufen, dass das Wärmeangebot die Nachfrage übersteigt.

Fossile Energiesysteme

Sowohl die fossil betriebenen WKK-Anlagen wie auch GuD-Kraftwerke zeigen erwartungsgemäss starke negative Umweltwirkungen. Aus Umweltsicht sollte daher auf den Bau bzw. Ausbau von fossil befeuerten Stromerzeugungsanlagen nach Möglichkeit verzichtet werden. Bei einem massiven Ausbau des Anteils der Stromerzeugungstechnologien mit fluktuierender Produktion (v.a. Windkraft- und Photovoltaikanlagen) können jedoch die Eigenheit der WKK- und GuD-Anlagen, dass deren Energieproduktion grundsätzlich regelbar ist, eine zunehmende Bedeutung erlangen.

Falls der Ausbau der erneuerbaren Energie und die Steigerung der Energieeffizienz nicht ausreichen, um nach dem Abschalten der grossen KKW die schweizerische Stromversorgung sicher zu stellen, braucht es zusätzliche Kriterien, um abzuwägen, ob fossile Energiesysteme oder der Ausbau der Importe von Strom aus dem Ausland zu bevorzugen sind.

Elektrizitäts- und Gasnetze

Der Ausbau der Energieübertragungsnetze hat z.T. starke Auswirkungen auf die Umwelt. Die beiden Energieübertragungssysteme bilden jedoch zwei lebensnotwendige Systeme der schweizerischen Energieversorgung, auf die nicht verzichtet werden kann.

Wenn der Anteil der erneuerbaren Stromerzeugung wie geplant ausgebaut werden soll und wenn die zentralisierte Struktur des heutigen elektrischen Netzes (Grosskraftwerke als Quellen, dezentrale Verbraucher) durch ein stärker dezentralisiertes Netz ersetzt werden soll, muss massiv in den Um- und Ausbau des elektrischen Netzes investiert werden.

Die Gasnetze sind hingegen auch für den gemäss Energiestrategie des Bundesrates in Betracht gezogenen Ausbau der fossilen Energieerzeugungsanlagen (inkl. mehrerer Gaskraftwerke) gerüstet. In der Annahme, dass neue gasbefeuerte WKK-Anlagen nur dort realisiert werden, wo es einen Anschluss an ein Gasnetz hat und wo die notwendigen Lieferkapazitäten verfügbar sind, müssen die Gasnetze in absehbarer Zukunft nicht ausgebaut werden.

ANHANG

- Anhang A Umweltkriterien gemäss ursprüngliches Pflichtenheft BAFU
- Anhang B Liste der interviewten Experten
- Anhang C Übersicht Ergebnisse Wirkungsanalyse
- Anhang D Literatur
- Anhang E Beurteilungsblätter

ANHANG A: UMWELTKRITERIEN GEMÄSS URSPRÜNGLICHEM PFLICHTENHEFT BAFU

Allgemeines

Bei der Darstellung der Auswirkungen auf die Umwelt gilt es zu beachten, dass verschiedene Umweltaspekte in Wechselwirkung zueinander stehen können. Allfälligen kumulativen Effekten ist Rechnung zu tragen.

Primär sind die Umweltauswirkungen in der Schweiz zu erfassen, Hinweise zu Auswirkungen im Ausland sind als solche zu nennen.

Weitere Informationen zu den Kriterien U1–U5

	Umweltkriterium	Wirkungsbeschreibung	Weitere Stichworte	Evtl. betroffene gesetzliche Grundlage
U1	Biodiversität	Wie wirkt sich die Massnahme auf die Vielfalt der Arten und der Lebensräume (Wasser, Wald, Gebirge, Boden) und insbesondere auf das ökologische Gleichgewicht aus?	Geschützte Arten Geschützte Lebensräume Rodungen Schadenskosten/Vermeidungskosten	Natur- und Heimatschutzgesetz NHG Gewässerschutzgesetz GSchG Waldgesetz WaG Jagdgesetz CBD
	Landschaftliche Vielfalt	Wie wirkt sich die Massnahme auf die Landschaften inkl. Naherholung, touristischen Wert von Landschaften, Kultur und Ästhetik aus?	Pärke Welterbe BLN (Landschaften von nationaler Bedeutung) Moorgebiete Schadenskosten/ Vermeidungskosten	NHG UNO CBD
	Flächennutzung	Wie wirkt sich die Massnahme auf den Verbrauch der Flächen und die Flächennutzung aus?	Versiegelung Zersiedelung	NHG
U2	Nachhaltige Nutzung erneuerbarer Ressourcen	Wie verhält sich die Massnahme zur Anforderung, dass die nachhaltige Nutzung der natürlichen Ressourcen insbesondere von Holz und Wasser gewährleistet ist?	Oberflächengewässer, Restwasser Grundwasser Effizienter Ressourceneinsatz Verhältnis zur Erneuerungsrate Schadenskosten/ Vermeidungskosten	Bundesverfassung USG GSchG UNO
	Nachhaltige Nutzung	Welche Auswirkungen hat die Massnahme auf	Seltene Elemente Weitere knappe Ma-	

	Umweltkriterium	Wirkungsbeschreibung	Weitere Stichworte	Evtl. betroffene gesetzliche Grundlage
	zung nicht erneuerbarer Ressourcen/Rohstoffe	die nachhaltige Nutzung von Rohstoffen wie seltene Elemente (z.B. Ausland für Hightech)?	Materialien für neue Technologien	
U3	Treibhausgase und fossile Energieträger	Welche Auswirkungen hat die Massnahme auf die Treibhausgasemissionen und auf den Verbrauch fossiler Energieträger bzw. deren effizientere Nutzung?	CO ₂ Methan Internalisierung externer Effekte/ Durchsetzung Verursacherprinzip	CO ₂ -Gesetz Internationale Klimakonvention
U4	Schadstoffemissionen/Immissionen	Wie verhält sich die Massnahme zum Ziel, die Schadstoffbelastung auf einem für die Umwelt und den Menschen unbedenklichen Niveau einzuhalten?	Feinstaub Schadstoffe, die in Luft, Boden, Wasser gelangen Internalisierung externer Effekte/ Durchsetzung Verursacherprinzip	Umweltschutzgesetz USG (TVA, LRV,..) GSchG
	NIS und Lärm	Wie verhält sich die Massnahme zum Ziel, die Belastung durch Nichtionisierende Strahlung NIS und Lärm auf einem für die Umwelt und den Menschen unbedenklichen Niveau einzuhalten?	NIS Lärm	USG
U5	Naturgefahren	Inwiefern trägt die Massnahme zur Verhinderung bzw. Minimierung von Umweltkatastrophen und -risiken bei?	Erdbeben Hochwasser/Überschwemmungen Rutschungen Lawinen Steinschlag Schadenskosten/-Vermeidungskosten	WaG und Wasserbaugesetz USG
	Störfall	Inwiefern trägt die Massnahme bei zur Verhinderung bzw. Minimierung von Störfallkatastrophen und -risiken?	Schadenskosten/-Vermeidungskosten	Störfallverordnung

ANHANG B: LISTE DER INTERVIEWTEN EXPERTEN

Nr.	Technologietyp	Nr.	Technologievariante	Interviewte Experten
Anlagen zur Energieerzeugung				
1	Wasserkraft	1.1	Kleinwasserkraft	R. Pfammater, WW-Verband
		1.2	Laufkraftwerke	
		1.3	Speicherkraftwerke	
		1.4	Pumpspeicherkraftwerke	
2	Windkraft	2.1	Kleinanlagen < 250 KW _{el}	M. Thommen, BAFU R. Rigassi, ENCO
		2.2	Grossanlagen > 250 KW _{el}	
		2.3	Windparks (>3 Anlagen)	
3	Solarenergie	3.1	Solarthermische Produktion	M. Thommen, BAFU S. Nowak, NET
		3.2	Photovoltaik gebäudebezogen	
		3.3	Photovoltaik, Freiflächenanlagen	
4	Biomasse	4.1	Industrielle/gewerbliche Vergärungsanlagen	R. Mural, BAFU
		4.2	Landwirtschaftliche Biogasanlagen	
		4.3	Holz-Heizkraftwerk	
5	Geothermie	5.1	Geotherm. Syst. zur Nutzung tiefer Aquifere	Gunter Siddiqi, BFE
		5.2	Stimulierte geothermische Systeme (EGS)	
6	Kehrichtverbrennung	6.1	KVA	-
7	Fossile E'systeme	7.1	Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen (WKK)	P. Jansohn, PSI
		7.2	GuD-Kraftwerke (Stromgeführt)	
Netze				
8	Elektrizitätsnetz	8.1	Freileitungen	E. Suter, BAFU Ch. Erdin, Ecosens
		8.2	Kabel	
9	Gasnetz	9.1	Gasnetz	P.Burgherr, PSI

ANHANG C: ÜBERSICHT ERGEBNISSE WIRKUNGSANALYSE

Ergebnis der Wirkungsanalyse				Umweltkrit.	Naturräume, Artenvielfalt			Klima	Schadstoffe, Lärm, NIS			Risiken			
FB Nr.	Technologietyp	Technologievariante		Unterkrit.	Biodiversität	Landschaftliche Vielfalt	Flächenutzung	Treibhausgase/fossile Energie	Schadstoffe	Lärm	Nicht ionisierende Strahlung	Naturgefahren	Störfall		
Anlagen zur Energieerzeugung															
1	Erneuerbare Energien	Wasserkraft	Kleinwasserkraft		B	R, B	R, B								
			Laufkraftwerke		B	R, B	R, B					B			
			Speicherkraftwerke		B	R, B	R, B					B			
			Pumpspeicher-kraftwerke		B	R, B	R, B					B			
		2	Windkraft	Kleinanlagen < 250 KW _{el}		B	R, B	R, B				B			
				Grossanlagen > 250 KW _{el}		B	R, B	R, B				B			
				Windparks (>3 Anlagen)		B	R, B	R, B				B			
		3	Solarenergie	Solarthermische Produktion			R, B								
				Photovoltaik gebäudebezogen			R, B		H, R, S	H, S					
				Photovoltaik, Freiflächen-Anlagen		R, B	R, B	R, B	H, R, S	H, S					
4a	Biomasse	Industrielle/gewerbliche Vergärungsanlagen			R, B	R, B	B	B							
		Landwirtschaftliche Biogasanlagen			R, B	R, B	B	B					B		
4b		Holz-Heizkraftwerk		B	R, B	R, B	B								
5	Geothermie	Geotherm. Syst. zur Nutzung tiefer Aquifere			R, B			B	B						
		Stimulierte geothermische Systeme (EGS)			R, B			B	B				R		
6		Kehrichtverbrennung	KVA					B							
7	Fossile Energien	Fossile Energiesysteme	Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen (WKK)					B	B						
			GuD-Anlagen (Stromgeführt)			R, B	R, B	B	B	R					
Netze															
8	Elektrizitätsnetz	Freileitungen			B	B	R, B			R, B	B				
		Kabel			B	R, B	R, B			R					
9		Gasnetz	Gas-Netz		R	R, B	R, B			R			(R), B		
					Wirkung: positiv   negativ   stark   schwach  			in Phase: H: Herstellung R: Realisierung, Bau B: Betrieb S: Stilllegung							

ANHANG D: LITERATUR

BAFU 2009: Unsere Energiezukunft – Szenarien. Umwelt 2/2009, Magazin des Bundesamtes für Umwelt, 2009.

BFE 2011a: Grundlagen für die Energiestrategie des Bundesrates, Aktualisierung der Energieperspektiven 2035 (energiewirtschaftliche Modelle), Zusammenfassung, Bern Mai 2011

BFE 2011b: Schweizerische Statistik der erneuerbaren Energien, Ausgabe 2010, Bern November 2011

BFE 2011c: Thermische Stromproduktion inklusive Wärmekraftkopplung (WKK) in der Schweiz, Ausgabe 2010, Bern November 2011

Frischknecht 2010: Ökobilanz verschiedener Kraftwerktechnologien. Frischknecht R., ESU-Services GmbH, in Dossier Pusch Thema Umwelt 4/ 2010.

Piot 2007: Potenziale erneuerbarer Energien zur Gewinnung von Strom in der Schweiz. Travail de Master. EPFL. Lausanne 2007.

Weitere spezifische Literaturquellen sind in den Beurteilungsblättern zu den einzelnen Technologien in Anhang E zu finden.

ANHANG E: BEURTEILUNGSBLÄTTER

Beurteilungsblatt Technologie Nr. 1: Wasserkraft	48
Beurteilungsblatt Technologie Nr. 2: Windkraft	61
Beurteilungsblatt Technologie Nr. 3: Sonnenenergie	70
Beurteilungsblatt Technologie Nr. 4A: Biomasse (ohne Holz)	80
Beurteilungsblatt Technologie Nr. 4B: Biomasse – Holzenergie	87
Beurteilungsblatt Technologie Nr. 5: Geothermie	91
Beurteilungsblatt Technologie Nr. 6: Strom und Wärme aus Kehrlichtverbrennungsanlagen (KVA)	97
Beurteilungsblatt Technologie Nr. 7: Fossile Strom- und Wärmeproduktion mit WKK- und GuD-Anlagen	103
Beurteilungsblatt Technologie Nr. 8: Elektrizitätsnetz	108
Beurteilungsblatt Technologie Nr. 9: Gasnetz	114

Energiestrategie 2050 – Umweltwirkungen Technologien

Beurteilungsblatt Technologie Nr. 1

Technologietyp: **Wasserkraft**
 Varianten: **Kleinwasserkraftwerke < 10 MWel**
 Grosswasserkraftwerke > 10 MWel
 - **Laufkraftwerke**
 - **Speicherkraftwerke**
 - **Pumpspeicherkraftwerke**
 Version/Datum: Version 4, 11. Oktober 2012
 Verfasser/in: J. Reutimann (INFRAS)

Wichtigste Umweltwirkungen

- Wasserkraftwerke können die ökologische und landschaftliche Qualität der Gewässer und in der Folge die Biodiversität und Erlebnis- und Erholungsqualität der Landschaft beeinträchtigen. Die Umweltwirkungen entstehen während dem Betrieb der Wasserkraftwerke durch geringe Restwassermengen, bei Laufkraftwerken durch die Unterbrechung des Flusskontinuums und den Verlust frei fliessender Gewässerstrecken, durch unnatürliche Wasserspiegelschwankungen und Beeinträchtigung des Geschiebehauhalts. Das Ausmass der Auswirkungen hängt stark von Typ, Technologie und Grösse der Anlage sowie vom Standort und den getroffenen Massnahmen zum Schutz der Biodiversität und der Landschaft ab.
- Insbesondere beim Bau neuer Kleinwasserkraft wird in der Regel in bislang unverbauten Gewässerabschnitten eingegriffen; zudem ist die zur Verfügung stehende Wassermenge oft zu knapp für die ausreichende und ökonomisch tragbare Dotierung funktionsfähiger Aufstiegshilfen oder Umgehungsgewässer. Die erzielte Energieproduktion ist im Verhältnis zu den Auswirkungen auf die Biodiversität relativ gering.
- Wasserkraftwerke (v.a. Speicher- und Pumpspeicherkraftwerke) können die Gefährdung durch Hochwasser senken. Angesichts der erwarteten Häufung von Hochwasservorkommen wegen der Klimaänderung gewinnen Synergien von Wasserkraftnutzung und Hochwasserschutz an Bedeutung.

Wirkung:
 positiv
 negativ
 stark
 schwach

in Phase:
 H: Herstellung
 R: Realisierung, Bau
 B: Betrieb
 S: Stilllegung, Rückbau

Die Abbildung zeigt Umweltauswirkungen bei Neuanlagen.

	Naturräume, Artenvielfalt			Klima	Schadstoffe, Lärm, NIS			Risiken	
	Biodiversität	Landschaftliche Vielfalt	Flächennutzung		Treibhausgase/fossile Energie	Schadstoffe	Lärm	Nicht ionisierende Strahlung	Naturgefahren
Kleinwasserkraft	B	R, B	R, B						
Laufkraftwerke	B	R, B	R, B					B	
Speicherkraftwerke	B	R, B	R, B					B	
Pumpspeicherkraftwerke	B	R, B	R, B					B	

Beurteilung

Vorbemerkungen:

Die Umweltwirkungen, die durch Wasserkraftwerke entstehen, sind in der Regel stark abhängig von Typ, Technologie und Standort der Anlage sowie von den getroffenen (baulichen) Massnahmen zur Reduktion der Umweltwirkungen, den geltenden Wassernutzungskonzessionen und der Einhaltung der gesetzlichen Bestimmungen (insb. in Bezug auf Restwassermengen, Schwall-Sunk, Geschiebehaushalt und freie Fischwanderung).

Die Umweltwirkungen von Wasserkraftwerken hängen zudem stark davon ab, ob es sich um Neubauten oder um Umbauten (Sanierung, Erneuerung) und Aus- bzw. Erweiterungsbauten (z.B. zwecks Erhöhung der Leistung oder der Speicherkapazität) bestehender Anlagen handelt. Letztere haben vergleichsweise geringe zusätzliche Umweltwirkungen oder bieten gar die Möglichkeit zur Verbesserung, z.B. durch den Einbau von Dotierturbinen oder der Erstellung naturnaher Umgehungsgewässer. Einerseits ist der Eingriff in die Natur bereits erfolgt, andererseits können die Bauten mit Verbesserungen im ökologischen Bereich einhergehen. Unbedenklich sind in der Regel namentlich an bestehende Infrastrukturen gebundene Wasserkraftwerke (Trinkwasserkraftwerke, Abwasserkraftwerke, Dotierwasserkraftwerke, Bewässerungsanlagen etc.) aus gewässerökologischer Sicht. *In der obigen Bewertungstabelle sind die Umweltwirkungen von Neuanlagen dargestellt.*

Hervorzuheben ist, dass sich die Schweizer Wasserkraftnutzung derzeit in einem Wandel befindet: Bestehenden Anlagen werden oftmals den seit 1991 geltenden Bestimmungen im GSchG in Bezug auf Restwassermengen noch nicht gerecht, wodurch ihre negativen Auswirkungen auf die Gewässerökosysteme höher sind als dies bei gesetzeskonformen (sanierten oder neu konzessionierten) bestehenden Anlagen der Fall ist. Die Frist für die Restwassersanierung läuft Ende 2012 ab. Die neuen Bestimmungen im Gewässerschutzgesetz, die am 1.1.2011 in Kraft getreten sind, verlangen Sanierungsmassnahmen zum Schutz der Biodiversität bis in 20 Jahren (BAFU Faktenblatt; GSchG Art. 39a, 43a, 83a). Anlagen, die neu gebaut werden und solche, welche diese neuen Bestimmungen des GSchG bereits erfüllen, haben demnach geringere Auswirkungen auf Gewässerökosysteme als bestehende, noch nicht sanierte Anlagen.

Biodiversität

Die Wirkungen auf die Biodiversität (aquatische und terrestrische Fauna und Flora), die während dem Betrieb der Wasserkraftwerke entstehen, werden bei Kleinwasserkraftwerken sowie bei Grosswasserkraftwerken (Wasserkraftwerken mit Speicherseen und Laufwasserkraftwerken) als stark negativ bewertet.

Durch Kleinwasserkraftwerke werden oft kleinere, ökologisch wertvolle Gewässer betroffen. Zudem fällt die erzielte Energieproduktion im Verhältnis zu den Auswirkungen auf die Biodiversität gering aus. Speicher- und Pumpspeicherkraftwerke mit Stauseen sind mit grösseren Eingriffen in die Natur verbunden und verändern das Fließregime; ebenso Laufkraftwerke, die durch Veränderung des Geschiebehaushalts die Biodiversität beeinträchtigen (vgl. Wirkungen auf die Biodiversität im folgenden Abschnitt). Diese Beurteilung gilt für Neubauten sowie bestehende Bauten der Klein- und Grosswasserkraft. Zu beachten ist dabei, dass es in der Schweiz für Grosswasserkraftwerke kaum noch geeignete freie Standorte für Neubauten gibt bzw. dass damit die letzten frei fliessenden Gewässerabschnitte der Mittellandflüsse verschwinden würden.

Umbauten und Erweiterungsbauten bestehender Grosswasserkraftwerke und Kleinwasserkraftwerke haben vergleichsweise geringe zusätzliche Auswirkungen auf die Biodiversität, da der Eingriff in die Natur bereits erfolgt ist. Zudem können sie mit Verbesserungen im ökologischen Bereich einhergehen. Ebenso sind an bestehende Infrastrukturen gebundene Wasserkraftwerke (Trinkwasserkraftwerke, Abwasserkraftwerke, Dotierwasserkraftwerke, Beschneiungs- und Bewässerungsanlagen etc.) aus gewässerökologischer Sicht meist unbedenklich.

Die ökologischen Auswirkungen von Wasserkraftanlagen auf die Gewässer hängen stark von den lokalen Gegebenheiten, den eingesetzten Technologien, dem Stand der Anlagen (Sanierung/Neubau) und der Konformität mit dem Gewässerschutzgesetz ab. Der Neubau von Wasserkraftwerken kann starke Wirkungen auf die Biodiversität hervorrufen, wenn die Anlagen an ökologisch wertvollen Fließgewässern, insbesondere

in oder nahe bei schützenswerten Gebieten, gebaut werden⁶. Durch bauliche Massnahmen können negative Effekte von Wasserkraftwerken auf die Biodiversität oft erheblich reduziert werden. Alle neu erstellten Anlagen müssen die Gesetze einhalten. Damit erfüllen sie schärfere Vorschriften als viele bestehende Kraftwerke, welche saniert werden müssen. Allerdings wird beim Bau neuer Wasserkraftwerke in der Regel in bisher ungenutzte Gewässerabschnitte eingegriffen.

Die Nutzung der Wasserkraft und die Regulierung der Gewässer zum Schutz vor Hochwasser haben die Gewässersysteme in der Schweiz verändert. Wasserkraftwerke können zu einer zusätzlichen Belastung der Gewässerökosysteme führen. Deren Artenvielfalt wird durch menschliche Aktivitäten (chemische Belastung, Überdüngung, Wasserentnahmen, Verbauung) bereits stark belastet (Eawag 2011). Von den ehemaligen Auen der Schweiz sind 91% verschwunden (Eawag 2011), und in der Folge leidet auch die entsprechende Flora (Pionier- bis Hartholzau) und Fauna, z.B. Brutvögel wie Flussregenpfeifer auf Kiesbänken oder Zugvögel wie diverse Limikolen (wie Wasserläufer, Bekassine) darunter.⁷ Durch die Wasserkraftnutzung sind aber auch neue, ökologisch wertvolle Lebensräume wie z.B. Flachwasserseen entstanden. Der Klingnauer-Stausee im Kanton Aargau beispielsweise ist heute ein Naturschutz- und Auengebiet von nationaler Bedeutung und bietet wichtige Lebensräume für bedrohte Vogelarten.

Die Wirkungen der Wasserkraft auf die Biodiversität entstehen wie folgt:

Restwasser: Zu geringe Restwassermengen können die Temperaturverhältnisse im Gewässer verändern und zu geringen Wassertiefen und Fließgeschwindigkeiten führen sowie zu einer mangelhaften Vernetzung der Fließgewässer und einer Beeinträchtigung von Biotopen, z.B. durch Absenkung des Grundwasserspiegels (Eawag 2011). Viele Fischarten benötigen für die Fortpflanzung Mindestwassermengen. Zu geringe Restwassermengen sind eine meistens Folge der Wasserkraftnutzungen. Bei ca. 1200 der ca. 1500 Wasserentnahmen zur Wasserkraftnutzung waren die Gewässer Anfangs der 90er Jahren unterhalb der Fassungen während eines grossen Teils des Jahres trockengelegt (BAFU Faktenblatt).

Die geltenden Bestimmungen im Gewässerschutzgesetz (GSchG) über die Restwassermengen stellen einen Kompromiss zwischen Schutz und Nutzung dar; aus ökologischer Sicht sind sie das absolute Minimum (BAFU Faktenblatt). Bei bestehenden Anlagen verlangt das Gewässerschutzgesetz (GSchG) bis Ende 2012 eine wirtschaftlich tragbare Restwassersanierung (Art. 80 Abs. 1 GSchG); in inventarisierten Gebieten kann sie über das wirtschaftlich tragbare Mass hinausgehen (Art. 80 Abs. 2 GSchG). Dieses Ziel dürfte nicht bei allen betroffenen Restwasserstrecken in der gesetzlichen Frist erreicht werden. Bei Neukonzessionierungen und bei der Erneuerung von Wasserkraftkonzessionen – welche zum Teil erst in 40 Jahren fällig werden – müssen angemessene Restwassermengen gesichert werden. Dies führt bei bestehenden Anlagen in der Regel zu einer Erhöhung der derzeitigen Restwassermengen (BAFU Faktenblatt).

Die in der Praxis vorhandenen Restwassermengen hängen demnach stark davon ab, ob es sich um Anlagen handelt, die nach Inkrafttreten des GSchG (nach 1991) konzessioniert worden sind, um ältere Anlagen, die bereits gesetzeskonform saniert sind oder um ältere Anlagen, die noch saniert werden müssen (vgl. Vorbemerkung). Tabelle 11 stellt die Beurteilung der Restwassermengen für Anlagen/Konzessionen unterschiedlichen Alters dar.

⁶ Die ökonomischen Anreize der KEV könnten zum vermehrten Bau von Kleinwasserkraftanlagen an Orten führen, die möglicherweise aus ökologischen Gründen ungeeignet sind (BAFU Faktenblatt, Website WWF Schweiz). Allerdings würde das Potenzial an ökologisch geeigneten Projekten wahrscheinlich ausreichen, um die aktuellen Energieziele für Kleinwasserkraft zu erreichen (EBP 2010).

⁷ Die Süsswasserfauna weist einen fünffach höheren Artenrückgang auf als terrestrische Lebensräume (Eawag 2011).

Alter der Anlage/Konzession	Beurteilung der Restwassermenge
Wasserkraftwerk mit Konzession von vor 1991; keine Restwassersanierung	Restwassermengen in der Regel zu tief, nicht gesetzeskonform, Restwassersanierung sollte gemäss GSchG bis Ende 2012 stattfinden.
Wasserkraftwerk mit Konzession von vor 1991; Sanierung gemäss GSchG hat stattgefunden	Restwassermengen gesetzeskonform, vollständige Sanierung erfolgt bei Neukonzessionierung (Sicherung angemessener Restwassermengen)
Bestehende, seit 1991 neukonzessionierte Anlagen	Restwassermengen gesetzeskonform
Seit 1991 neugebaute Anlagen	
Seit 2011 neugebaute Anlagen	Restwassermengen gesetzeskonform, Massnahmen zur Verhinderung der wesentlichen Beeinträchtigungen durch Schwall und Sunk, des Geschiebehaushaltes und der freien Fischwanderung gemäss revidiertem GSchG (seit 1.1.2011 in Kraft) integriert

Tabelle 11 Beurteilung: INFRAS.

Im Gegenvorschlag zur Initiative „Lebendiges Wasser“ wurden neue Gesetzesartikel formuliert. Diese neuen Bestimmungen im Gewässerschutzgesetz sind am 1.1.2011 in Kraft getreten. Sie lockern stellenweise die Restwasserbestimmungen (GSchG Art. 32). Allerdings verbessern sie auch den Schutz der Biodiversität, indem sie bis in 20 Jahren verlangen, dass geeignete Sanierungsmassnahmen getroffen werden, welche die negativen Auswirkungen von Schwall und Sunk unterhalb von Wasserkraftwerken durch bauliche Massnahmen (z.B. Ausgleichsbecken) vermindern (wodurch die Energieproduktion nicht beeinträchtigt wird), den Geschiebehaushalt reaktivieren und die Fischgängigkeit wiederherstellen (BAFU Faktenblatt; GSchG Art. 39a, 43a, 83a). Zudem fordert das Gewässerschutzgesetz von den Kantonen, die Revitalisierung von Gewässern zu planen (GSchG Art. 38a).

Unterbrechung Flusskontinuum/ Freie Fischwanderung: Wasserkraftwerke mit künstlichen Hindernissen (Talsperren und Wehre, Schwellen, Wasserfassungen) unterbrechen den Fluss als Längskontinuum. Dadurch wird die Fischwanderung behindert, und es werden vor allem Arten gefährdet, die lange Wanderungen durchführen (z.B. Nase, Aal) (Eawag 2011, BAFU Faktenblatt). Arten, die auf strömendes Wasser angewiesen sind, verlieren in den Stauseen ihren Lebensraum (Eawag 2011). Die Aufwärtswanderung der Fische kann an Kraftwerken allerdings mit Fischaufstiegshilfen ermöglicht werden. Nicht alle Fischpässe weisen jedoch einen guten Standard auf, und für einige Fischarten sind die bestehenden Fischpässe nicht geeignet. Für die Abwanderung an den Kraftwerken existieren in der Schweiz noch keine Abstiegshilfen. Beim Abstieg über die Turbinen werden viele Fische verletzt oder sterben (Eawag 2011). Wasserkraftwerke sind daher Mitverursacher für das Verschwinden verschiedener Fischarten in der Schweiz (BAFU Faktenblatt).

Schwall und Sunk: Bei der Produktion von Spitzenenergie durch Speicher- und Pumpspeicherkraftwerke erzeugen rund 25% der Wasserkraftwerke starke Abflussschwankungen (Schwall und Sunk), welche sich negativ auf Flora und Fauna der Gewässer auswirken (BAFU Faktenblatt). Vor allem die Fischbrut und Jungfische können unter Schwall-Sunk leiden (Eawag 2011). Der Schwallbetrieb kann sich je nach Gewässer sehr unterschiedlich auswirken: Beeinträchtigung der natürlichen Fortpflanzung bei Fischen und eine Verminderung des Fischbestandes, eine abnehmende Arten- und Individuenzahl bei wirbellosen Bewohnern der Flusssohle (v.a. Insektenlarven). Bei einer Katastrophendrift werden Wirbellose und Jungfische bei Schwallbeginn abgeschwemmt. Diese Organismen stranden bei Schwallrückgang auf den trockenfallenden Uferstreifen.

Geschiebehaushalt: Wasserkraftwerke mit ihrer Unterbrechung des Flusskontinuums verändern den Feststoff- und Geschiebehaushalt im Staubereich und flussabwärts.

Dies führt zum Verlust von strukturiertem Lebensraum für strömungsliebende Arten (z.B. Laichgründe für kieslaichende Fische). Unterhalb der Stauanlagen/Stauseen kann sich der Fluss wegen fehlendem Geschiebe eintiefen, was neue Ufersicherungen oder künstliche Stabilisierung der Sohle erfordert (Eawag 2011). Ins Gewicht fällt diese Auswirkung namentlich bei Laufkraftwerken an den Mittellandflüssen, wo der Geschiebenachschub je nach geografischer Situation völlig zum Erliegen kommen kann.

Stauraummanagement: Die Spülung von Speicherseen und Flusstauhaltungen kann Fische und Kleinorganismen durch Schwall- und Ablagerungseffekte und unnatürliche Wasserspiegelschwankungen im Staubereich beeinträchtigen. Ein gezieltes Spülmanagement kann aber negative Effekte mildern oder sogar positive Wirkungen haben, wenn Spülungen im richtigen Moment die ausbleibenden Hochwasser mit Geschiebetrieb simulieren (Eawag 2011).

Entnahme von Schwemmgut: Um Schäden an Turbinen zu vermeiden, wird Schwemmgut an den Rechenanlagen von Wasserkraftwerken entnommen. Ufernahe Bäume werden vorsorglich gefällt, damit sie bei Hochwasser nicht abgeschwemmt werden und Hochwasserschäden verursachen. Schwemmh Holz und Laub sind jedoch für viele Arten Lebensraum und Nahrung und strukturieren das Gewässer. Bauliche Massnahmen am Wehr, das Sichern von Einzelbäumen sowie ein angepasstes Schwemmselmanagement können die negativen Effekte auf die Biodiversität mindern. Positiv ist, dass mit dem Schwemmgut auch Abfall (Plastik etc.) aus den Gewässern entfernt wird (Eawag 2011).

Landschaftliche Vielfalt

Die Wirkungen auf die landschaftliche Vielfalt, die durch den Neubau und den Betrieb von Wasserkraftwerken anfallen, werden für alle Wasserkraftwerkstypen (Lauf- und Kleinwasserkraftwerke sowie Speicher- und Pumpspeicherkraftwerken) als stark negativ eingestuft. Im Einzelfall sind sie stark von Standort und Typ der Anlage abhängig. Tendenziell werden die negativen Wirkungen der Laufkraftwerke im Vergleich zu den anderen Varianten als etwas geringer, aber durch den Verlust des Fließgewässercharakters immer noch gross, eingeschätzt.

Umbauten (Sanierung, Erneuerung) und **Aus- bzw. Erweiterungsbauten** (z.B. zwecks Erhöhung der Leistung oder der Speicherkapazität) bestehender Gross- und Kleinwasserkraftwerken haben vergleichsweise geringe zusätzliche Umweltwirkungen auf die landschaftliche Vielfalt. Einerseits ist der Eingriff in die Natur bereits erfolgt oder er ist marginal (z.B. Ersatz von Turbinen zwecks Erhöhung der Leistung und/oder der Energieproduktion). Dies gilt insbesondere auch für an bestehende Infrastrukturen gebundene Wasserkraftwerke (Trinkwasserkraftwerke, Abwasserkraftwerke, Dotierwasserkraftwerke, Bewässerungsanlagen etc.). Andererseits können die Bauten mit Verbesserungen im ökologischen Bereich einhergehen.

Wasserkraftwerke können in Abhängigkeit ihrer Grösse und Konstruktion das Landschaftsbild verändern, die Erlebnis- und Erholungsqualität der Landschaft und dabei auch die Tourismus- und Erholungsnutzung beeinträchtigen, z.B. durch Aufstau von Gewässern, künstliche Abflusssituationen, Beeinträchtigung von Ufervegetation und Auen sowie durch Staumauern, Wehre, Druckleitungen und Hochspannungsleitungen (BAFU Faktenblatt). In Flusstauräumen werden mit dem Kraftwerkbau meist die Ufer durch Zufahrtsstrassen verbaut, um den Unterhalt zu erleichtern oder um dank Dämmen eine grössere Stau- bzw. Fallhöhe nutzen zu können (Eawag 2011).

Wasserkraftwerke und Speicherseen können Erholungsraum bieten und auch touristisch attraktiv sein (z.B. Sihlsee, Staumauer Grande Dixence), was aber nicht einer Umweltleistung gleichkommt. Es gibt einige historische Kraftwerke, welche heute unter Denkmalschutz stehen (z.B. Laufkraftwerk Wohlensee) (BAFU Faktenblatt).

Die durch die neuen Bestimmungen im GSchG geforderten Sanierungen bringen Nutzen für Natur und Landschaft und können auch für Tourismus und Erholungsnutzung Verbesserungen herbeiführen (BAFU Faktenblatt). Zudem können von den Kantonen geforderte Revitalisierungen von Gewässern (GSchG Art. 38a) negative Einwirkungen auf die landwirtschaftliche Vielfalt mindern.

Flächennutzung

Die Umweltwirkungen der Flächennutzung während der Bau- und Betriebsphase von Wasserkraftwerken (alle Typen) werden als schwach negativ eingestuft. Der Neubau von Speicherseen in Gebieten mit grosser Flächennutzungskonkurrenz (z.B. mit dem grossflächigen Verlust von Kulturland) ist nicht mehr zu erwarten.

In der Schweiz sind viele Gewässer durch Wasserkraftnutzung verbaut (BAFU Faktenblatt). Der Bau von Zufahrtsstrassen, Druck- und Übertragungsleitungen von Wasserkraftwerken erhöhen die Flächennutzung. In Flusstauräumen wurden mit dem Kraftwerksbau meist die Ufer verbaut, um den Unterhalt zu erleichtern oder um dank Dämmen eine grössere Stau- bzw. Fallhöhe nutzen zu können (Eawag 2011).

Treibhausgase und fossile Energieträger

Die Treibhausgasemissionen, die durch Bau und Betrieb von Kleinwasserkraft-, Laufwasserkraft-, Speicher- und Pumpspeicherkraftwerke anfallen, werden als vernachlässigbar eingestuft.

Anlagentyp	Typische Treibhausgasemissionen (g CO ₂ -e/kWh)	Datenquelle
Kleinwasserkraftwerke (integriert)	ca. 2 g CO ₂ -e/kWh	ESU-Services, Flury K., Frischknecht R., Itten R. 2010
Kleinwasserkraftwerke	ca. 5 g CO ₂ -e/kWh	
Laufkraftwerke	ca. 4 g CO ₂ -e/kWh	
Speicherkraftwerke	ca. 6 g CO ₂ -e/kWh	
Pumpspeicherkraftwerke (ohne Umwälzwerke)	ca. 11 g CO ₂ -e/kWh	
Wasserkraft Schweiz allgemein	< 10 g CO ₂ -e/kWh	ETH 2011

Tabelle 12: THG-Emissionen der verschiedenen Prozessstufen bei der Produktion von Strom mit verschiedenen Wasserkraftwerken (ohne THG-Emissionen von Verteilnetz und Verluste). Kleinwasserkraftwerke (integriert) sind in eine Bewässerungs- oder Trinkwasserversorgung integrierte Nebennutzungskraftwerke. Reine Pumpspeicherkraftwerke (Umwälzwerke) sind nicht abgebildet. Quelle: ESU-Services.

Typische Treibhausgasemissionen für Schweizer Wasserkraftwerke betragen über den gesamten Lebenszyklus betrachtet weniger als 10 g CO₂-e/kWh (ETH 2011; Tabelle 12). Bei der ökologischen Bilanzierung von Wasserkraftwerken ist zu berücksichtigen, dass die Ergebnisse der Bilanz stärker als bei anderen erneuerbaren Energietechnologien von der spezifischen Anlage abhängen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass weniger die standardisierte Energietechnologie selber bzw. deren Betrieb, Wartung etc. für die Umweltwirkungen verantwortlich sind, sondern die zum Betrieb der Energiewandler notwendigen Bauten, beispielsweise Wehre, Staudämme, Ausleitungskanäle etc. (DLR/IFEU/WI 2004).

Spezifische Treibhausgasemissionen von Strom aus **Speicherkraftwerken** (ohne Pumpen) betragen ca. 6 g CO₂-e/kWh (Tabelle 12). Gemäss Erkenntnissen aus Ökobilanzen entstehen die meisten Treibhausgasemissionen bei der Infrastrukturbereitstellung (Herstellungs- und Realisierungs-/Bauphase), gefolgt von den Emissionen aus Stauseen, die in der Betriebsphase anfallen. Aus flachen Stauseen können Methan und CO₂ mit vom Grund aufsteigenden Blasen sowie beim Turbinieren des Wassers entweichen (Eawag 2011). Diese Emissionen sind aber nicht vollumfänglich auf die Wasserkraftnutzung zurück zu führen, denn auch natürliche Gewässer sind Treibhausgasemittenten (Raadal et al. 2011). Auch die Stilllegung eines Speicherkraftwerks kann zu Treibhausgasemissionen führen, wenn der in Sedimenten gebundene organische Kohlenstoff abgebaut wird (DLR 2004, Pacca 2007).

Treibhausgasemissionen von Strom aus **Pumpspeicherkraftwerken** sind typischer-

weise höher als diejenigen von Strom aus Speicherkraftwerken. Sie setzen sich aus den Emissionen von Speicherkraftwerken und den Emissionen des verwendeten Pumpstromproduktes zusammen. Um eine Kilowattstunde Strom zu speichern, wird ca. 1.2 kWh Pumpenergie benötigt.⁸ Die Herkunft des Pumpstroms hat also einen wesentlichen Einfluss auf die CO₂-Bilanz des zwischengespeicherten Stroms von Pumpspeicherkraftwerken. Als Wasserkraft darf nur der natürliche Zufluss ausgewiesen werden, gepumpte Wassermengen sind aufgrund der Herkunft des Pumpstroms zu verbuchen.⁹ Damit gibt es kein Grünwaschen des Pumpstroms.

Gemäss Erkenntnissen aus Ökobilanzen betragen die Treibhausgasemissionen von **Pumpspeicherkraftwerken** ca. 11 g CO₂-e/kWh (Flury K., Frischknecht R., Itten R. 2010, Tabelle 12). Ca. die Hälfte dieser Emissionen fällt in der Betriebsphase durch den Pumpstrom an, der für den Betrieb der Speicherpumpen aufgewendet werden muss. Weitere Emissionen entstehen durch die Infrastrukturbereitstellung, und der kleinste Anteil der THG-Emissionen entsteht durch Methanemissionen aus Stauseen (Flury K., Frischknecht R., Itten R. 2010).

Spezifische Treibhausgasemissionen von **Laufwasserkraftwerken** betragen knapp 4 g CO₂-e pro kWh (Tabelle 12). Sie sind zum grössten Teil durch die Infrastrukturbereitstellung (Herstellungs- und Realisierungs-/Bauphase) verursacht und nur ein kleiner Teil stammt von aus Stauseen (Flury K., Frischknecht R., Itten R. 2012). Im Durchschnitt sind die Methanemissionen aus Stauseen bei Laufkraftwerken geringer als bei Speicherkraftwerken, da Laufkraftwerke nicht immer über einen Stausee verfügen (Flury K., Frischknecht R., Itten R. 2012, Tabelle 12).

Die Treibhausgasemissionen, die durch **Kleinwasserkraftwerke** entstehen, betragen ca. 5 g CO₂-e pro kWh, bei integrierten Bewässerungs- oder Trinkwasserversorgungswerken sogar nur ca. 2 g CO₂-e pro kWh. Sie werden in der Herstellungs- und Realisierungs-/Bauphase durch die Infrastrukturbereitstellung verursacht (Flury K., Frischknecht R., Itten R. 2012, Tabelle 12).

Schadstoffe

Die Schadstoffemissionen, die während des gesamten Lebenszyklus von Wasserkraftwerken (alle Typen) entstehen, werden als vernachlässigbar bewertet. Sie betragen 10–80 mg NO_x und 15–60 mg PM10 (BAFU 2009).

Naturgefahren

Die Wirkungen auf Naturgefahren, die beim Betrieb von Speicher- und Pumpspeicherkraftwerken entstehen, werden als stark positiv eingestuft; bei Laufkraftwerken als leicht positiv.

Wasserkraftwerke können die Hochwassergefährdung senken. Dies kann mittels Speichern geschehen oder bei Flusskraftwerken durch gezielte Abflussregelung. Je grösser die Pufferkapazität im Verhältnis zum Abfluss ist, desto wirkungsvoller ist der Hochwasserschutz (ProClim/OcCC 2003). Speicherseen leisten ohne spezielle Betriebseinschränkungen einen wichtigen Beitrag zum Hochwasserschutz, denn sie sind fast nie randvoll und könnten zusätzliche Wassermengen aufnehmen (ProClim/OcCC 2003). Insbesondere Speicherseen in den Alpen können bei starken Niederschlägen grosse Mengen Wasser und Geschiebe zurückhalten und dadurch Überschwemmungen und Schäden flussabwärts begrenzen (Website BFE, BAFU Faktenblatt, Schweizer Talsperrenkomitee 2011). Dadurch werden vor allem mittlere Hochwasser vermin-

⁸ Bei Pumpspeicherkraftwerken wird zu Niedertarifzeiten Wasser aus dem tieferen Staubecken in das höher gelegene Staubecken gepumpt und bei hoher Nachfrage (Mittag/Abend) turbinert. Der Wirkungsgrad von Pumpen beträgt ca. 83% (BFE 2008). Daraus resultiert: Treibhausgasemission von Pumpspeicherstrom = Emission aus Speicherkraftwerk + 1.2 * Emission des verwendeten Pumpstromproduktes.

⁹ Aufgrund der Stromkennzeichnungspflicht muss jeder Stromproduzent im Rahmen einer Elektrizitätsbuchhaltung die Energieträger, welche zur Produktion der Elektrizität eingesetzt wurden, sowie die Herkunft der Elektrizität (Produktion im In- oder Ausland) der Aufsichtsstelle mitteilen. Als Wasserkraft darf nur der natürliche Zufluss ausgewiesen werden, gepumpte Wassermengen sind aufgrund der Herkunft des Pumpstroms zu verbuchen. Damit gibt es kein Grünwaschen des Pumpstroms (BAFU Faktenblatt).

dert. Die Kapazität ist jedoch zu klein um die wirklich schadenerzeugenden grossen Hochwasser vollständig aufzufangen, und oft muss bei grossen Ereignissen (z.B. Mai 1999, Oktober 2000) turbiniert werden (ProClim/OcCC 2003).

Durch die Klimaänderung werden in Zukunft höhere Hochwasser im Winter und Frühjahr sowie neue Höchstwassermengen erwartet, und die Variabilität der Ereignisse (Hochwasser, Naturgefahren) wird grösser sein (ETH 2011, ProClim/OcCC 2003). Dadurch wird der Beitrag der Wasserkraftwerke zum Hochwasserschutz an Bedeutung gewinnen und sollte auch aktiv ausgebaut werden. Bei Flusskraftwerken müssten allenfalls die Kapazitäten der Turbinen bzw. der Hochwasserentlastungen neu ausgelegt werden. Mit den veränderten Bedingungen fehlt die Erfahrung. Es ist deshalb schwierig abzuschätzen, ob der Hochwasserschutz in Zukunft mit der gleichen Sicherheitsmarge bzw. demselben Restrisiko garantiert werden kann (ProClim/OcCC 2003).

Weiter wird davon ausgegangen, dass Naturgefahren zunehmend grössere Schäden an den Wasserkraftanlagen verursachen werden. Der Einfluss der Klimaänderung könnte zudem den Sediment-, Geschiebe- und Geschwemmseltransport erhöhen und die Verlandung verstärken. Dies könnte Anpassungsinvestitionen und erhöhte Betriebsaufwendungen der Kraftwerksbetreiber erfordern; Die Verwundbarkeit von kritischen Systemkomponenten muss verringert werden (z.B. Übermittlungskabel für Steuerungen) (ProClim/OcCC 2003).

Störfall / Havarie

Die Wirkungen von Störfällen, die beim Betrieb von Wasserkraftwerken (alle Typen) entstehen können, werden als vernachlässigbar eingestuft.

Störfälle sind bei allen Typen der Wasserkraftanlagen möglich; sie können durch Schwallwellen (schneller Anstieg des Wasserspiegels), durch Druckleitungsbruch oder Bruch von Talsperren entstehen. Das Schadensausmass im Störfall ist stark abhängig von der Art der Anlage. Grundsätzlich kann das Risiko bei Speicher- und Pumpspeicherkraft (Hochdruckkraftwerken) als leicht höher eingestuft werden als bei Lauf- und Kleinwasserkraft (Niederdruckkraftwerken).

Bei grossen Talsperren kann das Schadensausmass bei Auftreten eines Störfalls enorm sein. In der Schweiz ist die Standfestigkeit der Anlagen jedoch kaum gefährdet, da sehr hohe Sicherheitsstandards erfüllt werden müssen (ProClim/OcCC 2003). Das Risiko von Damnbrüchen bei Speicher- und Pumpspeicherkraftwerken ist in der Schweiz äusserst gering, weil Talsperren und das Einzugsgebiet ständig kontrolliert werden und bei Planung und Bau die Standfestigkeit der Dämme in allen denkbaren Lastfällen – unter Berücksichtigung des Eigengewichts des Bauwerks, des Wasserdrucks, der Beschaffenheit der Sedimente, der klimatischen Einflüsse sowie von möglichen Auswirkungen von Naturereignissen wie Bergstürzen, Erdbeben, Murgängen – sichergestellt wird (BWG 2004)¹⁰.

Die gesetzlichen Anforderungen an die Sicherheit von Stauanlagen sind in der Verordnung über die Sicherheit der Stauanlagen (Stauanlagenverordnung, StAV) des Bundes geregelt.

Ausgangslage, Bedeutung der Technologie

In der Schweiz stammt heute rund 56% des Stroms aus Wasserkraft (Website BFE). Davon werden rund 47% in Laufwasserkraftwerken, 49% in Speicherkraftwerken und rund 4% in Pumpspeicherkraftwerken erzeugt (Website BFE). Die hydrologischen Verhältnisse wirken sich auf die Elektrizitätsproduktion aus (Winterhalbjahr, Trockenjahr, etc.). Der Ausbau der Wasserkraft ist in der Schweiz weitgehend abgeschlossen. Daher sind Umweltwirkungen, die während der Herstellungs- und Realisierungsphase angefallen sind (z.B. CO₂-Emissionen bei Herstellungs- und Bauphase), bereits erfolgt und nicht in jedem Fall rückgängig zu machen.

¹⁰ Alle fünf Jahre, in Problemzonen häufiger, werden Gutachten nach den neusten Erkenntnissen erstellt (ProClim/OcCC 2003). Wissenschaftler und Ingenieure, Geologen, Limnologen usw. tragen zu einer guten Überwachung bei.

Aussichten, Zukünftige Entwicklungspotenziale

Über die Möglichkeiten beim Ausbau der Wasserkraft wird stark diskutiert. Das BFE veröffentlichte am 04.06.2012 eine Studie zum Ausbaupotenzial der Wasserkraft bis 2050. Nach Anhörung von Kantonen, Wissenschaft, Umweltverbänden und der Strombranche weist die Studie unter heutigen Nutzungsbedingungen ein Ausbaupotenzial für von rund 1.5 TWh/a aus. Unter optimierten Nutzungsbedingungen, ohne Lockerung der Umwelt- und Gewässerschutzbestimmungen aber mit verbesserten wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Rahmenbedingungen, kann die Wasserkraft bis 2050 um 3.2 TWh/a ausgebaut werden. Das Potenzial für Pumpspeicherwasserkraft wird auf 7.5 TWh geschätzt (BFE 2012b). Insbesondere soll der Zubau mittels Einspeisevergütung bei Kleinwasserkraftwerken gefördert werden. Szenarien der ETH (2011) gehen bis 2035 von einer Zunahme des Wasserkraftstroms um bis zu 4 TWh aus. Das BAFU beziffert das nachhaltig nutzbare Potenzial bis 2050 auf 3.5 TWh plus 6 TWh Pumpspeicherwasserkraft. Danach wird eine Stabilisierung erwartet. Diese Zunahme ist das Resultat von wenig Ausbau der Gross- und Kleinwasserkraft, technologischen Verbesserungen, Minderproduktion infolge von Restwassersanierungen und infolge der Klimaerwärmung (ETH 2011). Ein Ausbau von 4 TWh würde eine Anpassung der Rahmenbedingungen voraussetzen (Investitionssicherheit).

Pumpspeicherkraftwerken kommt eine zentrale Bedeutung als Speicher von Überschussenergie bis zum Zeitpunkt des Bedarfs zu, die auch saisonale Umlagerungen (von Sommer in den Winter) ermöglichen. Sie sind Voraussetzung für den massiven Ausbau von fluktuierenden erneuerbaren Energien (siehe auch Abschnitt Chancen). Gegenwärtig werden einige Speicherkraftwerke zu Pumpwerken ausgebaut, was bei relativ geringen Umwelteinflüssen möglich ist und durch die neuen Bestimmungen im Gewässerschutzgesetz, welche eine Flexibilisierung der Restwasserbestimmungen zulassen, noch vereinfacht wird (BAFU Faktenblatt). Der Ausbau der Pumpspeicherkraftwerke wird teilweise neue leistungsfähige Leitungen oder die Verstärkung existierender Leitungen zwischen den Netzknotenpunkten bedingen (ETH 2011). Der Bundesrat sieht grosses Potenzial für Pumpspeicherkraftwerke in der Schweiz, da diese grosse Mengen Strom speichern, die auch Nachbarländern zum Ausgleich der schwankenden Stromproduktion aus Wind- und Sonnenenergie zur Verfügung gestellt werden können (BFE 2012a).

Chancen

Vor dem Hintergrund der zunehmenden dezentralen Stromproduktion durch erneuerbare Energien im europäischen Kontext gewinnt der Ausbau von Speicherkraftwerken zu Pumpspeicherwerken an Bedeutung, denn Speicherseen und insbesondere Pumpspeicherkraftwerke ermöglichen die Stromspeicherung und damit einen Lastausgleich, sowohl für den saisonalen als auch für den im Tagesverlauf schwankenden Energieverbrauch oder bei Störungen. Zudem erleichtern sie die Integration fluktuierender erneuerbarer Stromerzeugung ins Energiesystem, was insbesondere bis ca. 2030 als sehr wichtig erachtet wird, um den Aufwand für den Ausbau des elektrischen Netzes in Grenzen zu halten (ETH 2011, BAFU Faktenblatt).

Als ökologisch sinnvoll erachtet wird die Sanierung von bestehenden Grosskraftwerken, die die Stromproduktion erhöht bei gleichzeitigen ökologischen Verbesserungen, sowie der Bau von umweltverträglichen Kleinwasserkraftwerken (Website WWF Schweiz, EBP 2010). An bestehende Infrastrukturen gebundene Wasserkraftwerke (Nebennutzungskraftwerke) wie z.B. Trinkwasser-, Abwasser-, Kühlwasser-, Bewässerungswasser-, Tunnelwasser- und Drainagewasserkraftwerke usw. sowie Dotierwasserkraftwerke¹¹ und Energierückgewinnung sind aus gewässerökologischer Sicht meist unbedenklich¹².

Speicherseen von Wasserkraftwerken könnten in Zukunft teilweise für ein Trinkwassermanagement genutzt werden. Dadurch resultieren positive Synergien mit der

¹¹ Turbinieren das abzugebende Dotierwassers (Wassermenge, die zur Sicherstellung einer bestimmten Restwassermenge bei der Wasserentnahme im Gewässer belassen wird), meistens am Wehrfuss.

¹² Abbau überschüssigen Drucks in Rohrsystemen verschiedener Medien mit einer **Entspannungsturbine** (statt "Druckvernichten").

Stromproduktion aus Wasserkraft.

Bisherige Studien bewerten die global-ökologischen Nutzen der Wasserkraft für den Klimaschutz aufgrund ihrer tiefen CO₂-Bilanz höher als die (ökologischen) externen Kosten der Wasserkraft. Unter dem globalen Blickwinkel ist die Gesamtokobilanz der Wasserkraftnutzung im Vergleich mit anderen Systemen daher positiv (ProClim/OcCC 2003).

Risiken

Ein Grossteil der erschliessbaren Wasserkraft wird bereits genutzt. Durch den Ausbau der Wasserkraft werden auch weitere bisher ungenutzte Fliessgewässerstrecken verbaut. In diesen Fällen ist davon auszugehen, dass die ökologischen bzw. landschaftlichen Kosten im Vergleich zur energetischen Mehrproduktion überproportional ansteigen. Die ökonomischen Anreize der KEV führen zum vermehrten Bau von bisher nicht wirtschaftlichen Kleinwasserkraftanlagen auch an Orten, die aus landschaftlichen und/oder ökologischen Gründen ungeeignet sind (BAFU Faktenblatt, Website WWF Schweiz). Allerdings würde das Potenzial an ökologisch geeigneten Projekten wahrscheinlich ausreichen, um die aktuellen Energieziele für Kleinwasserkraft zu erreichen (EBP 2010).

Die Klimaänderung verursacht eine Verschiebung des hydrologischen Jahreszyklus, was Auswirkungen auf die Wasserkraftnutzung hat (SWV 2011, ETH 2011). Das Projekt „Klimaänderung und Wasserkraftnutzung“ geht für den Zeitraum 2021–2050 im Winter von einem Anstieg der mittleren Produktion um rund 10% und im Sommer von einer Abnahme um 4% bis 6% aus (SWV 2011). Diese saisonalen Veränderungen bewirken über das gesamte Jahr gesehen eine leichte Zunahme zwischen 0.9% und 1.9%. Die mittlere Stromproduktion aus der Wasserkraftnutzung in der Schweiz wird sich daher nicht wesentlich verändern. In einigen Regionen (Tessin, Wallis) muss aber mit Produktionsabnahmen gerechnet werden (SWV 2011).

Handlungsbedarf/ Handlungsansätze

Die Kantone sind bei der Umsetzung des Gewässerschutzgesetzes gefordert, insbesondere wenn es um ausstehende Restwassersanierungen bestehender Kraftwerke geht, die gemäss GSchG bis Ende 2012 abgeschlossen sein sollten.

Im Sinne einer Positivplanung sollen primär die aus Umweltsicht unproblematischen erneuerbaren Energien zugebaut werden können. Als Instrument bieten sich hierzu Gebietsausscheidungen (Massnahme 36 ES 2050) an, die unter Berücksichtigung der Umweltschutzziele (Kombination von Positiv- und Negativplanung) auf Stufe Kanton durchgeführt werden und die Kantone allenfalls zu einer Ausscheidung verpflichten. BAFU, BFE, ARE haben diesbezüglich 2011 die „Empfehlung zur Erarbeitung kantonaler Schutz- und Nutzungsstrategien im Bereich Kleinwasserkraftwerke“ publiziert, welche sinngemäss auch für Grosswasserkraftwerke angewendet werden kann.

Instrumente zur Minimierung der Umweltwirkungen

Das Gewässerschutzgesetz (GSchG) verlangt bei bestehenden Wasserkraftanlagen bis Ende 2012 eine wirtschaftlich tragbare Restwassersanierung (Art. 80, Abs. 1 GSchG); in inventarisierten Gebieten kann sie über das wirtschaftlich tragbare Mass hinausgehen (Art. 80 Abs. 2 GSchG). Bei Neukonzessionierungen und bei der Erneuerung von Wasserkraftkonzessionen – welche zum Teil erst in 40 Jahren fällig werden – müssen angemessene Restwassermengen gesichert werden.

Die neuen Bestimmungen im Gewässerschutzgesetz (in Kraft seit 1.1.2011) bieten Chancen zur ökologischen Verbesserung der Wasserkraft, indem sie in den nächsten 20 Jahren Sanierungen zum Schutz vor Schwall und Sunk und vor Veränderungen des Geschiebehauhalts und die Wiederherstellung der Fischwanderung verlangen. Gleichzeitig ermöglichen sie in bestimmten Fällen Ausnahmen bei der Festlegung von Restwassermengen zu Gunsten der Wasserkraftnutzung (GSchG, Art.32).

Die neuen Bestimmungen im Gewässerschutzgesetz ermöglichen auch flexiblere Festlegung des Raumbedarfs von Gewässern, der u.a. auch zur Gewährleistung von Hochwasserschutz von Bedeutung ist (GSchG Art. 36a).

Eine Vollzugshilfe für Behörden bietet die „Empfehlung zur Erarbeitung kantonaler Schutz- und Nutzungsstrategien im Bereich Kleinwasserkraftwerke“ (BAFU, BFE, ARE 2011).

Eine Zertifizierung von Wasserkraftwerken mit dem Label „naturmade star“ hat in der

Regel die Verbesserung der ökologischen Qualität der genutzten Gewässer zur Folge, weil dieses Label angemessene Restwassermengen, naturnahe Ufergestaltung und Fischtreppen verlangt.

Weitere Aspekte

Nachhaltigkeitsbilanz

Unter zusätzlichem Einbezug von Gesellschaft und Wirtschaft ist die Nachhaltigkeitsbilanz der Wasserkraft für die Schweiz und Westeuropa positiv. Die Bilanz wird sehr gut, wenn die negativen Aspekte minimiert werden (ProClim/OcCC 2003).

Ökobilanz

Die Gesamtumweltauswirkungen (Umweltbelastung an der Steckdose), ausgedrückt in Umweltbelastungspunkten (UBP) gemäss der Methode der ökologischen Knappheit 2006 liegen für Schweizer Wasserkraft (Durchschnitt der Lauf- und Speicherwerke) bei ca. 70 UBP pro kWh (Frischknecht 2010). Für Pumpspeicherkraftwerke liegt die Umweltbelastung bei über 600 UBP pro kWh und ist damit rund 40 Prozent höher als jene des Schweizer Strommixes, weil pro Kilowattstunde Pumpspeicherstrom rund 1.25 bis 1.4 Kilowattstunden Strom zum Hochpumpen des Wassers benötigt werden. Die Umweltbilanz von Pumpspeicherstrom widerspiegelt also die durch den Verlust von 20% bis 30% erhöhte Umweltbilanz des eingesetzten Strommixes (Flury K., Frischknecht R., Itten R. 2012). Ökobilanzen alleine genügen jedoch nicht, um die wesentlichen Umweltauswirkungen der Wasserkraft vollständig abzubilden. Um Auswirkungen auf das Gewässerökosystem zu minimieren, müssen zusätzliche Anforderungen erfüllt sein (Flury K., Frischknecht R., Itten R. 2012).

Energieerntefaktor und energetische Amortisationszeit

Ein Mass in der Energiewirtschaft ist der Energieerntefaktor, der beschreibt, wie viel Mal mehr Elektrizität ein Kraftwerk während seiner gesamten Lebensdauer (E_R) erzeugt, im Vergleich zur Energiemenge, die bei der Herstellung der Anlage benötigt wird ("graue Energie"). Anders ausgedrückt: Der Erntefaktor E_F beschreibt das Verhältnis der genutzten Energie E_R zur investierten Energie E_I ($E_F = E_R/E_I$). Je höher dieser Wert, desto effizienter ist die Energiequelle.

Ein anderes Mass ist die energetische Amortisationszeit, d.h. der Zeitraum, der verstreicht, bis ein Kraftwerk den gesamten für alle Stufen seines Lebenszyklus benötigten Energieaufwand durch den eigens erzeugten Strom wieder kompensiert hat. Tabelle 13 zeigt typische Energieerntefaktoren und energetische Amortisationszeiten (wobei bei den Erntefaktoren nur die reinen Herstellungserntefaktoren angegeben, Energieaufwendungen für Betrieb und Abriss jedoch nicht berücksichtigt sind).

	Energieerntefaktor	Energetische Amortisationszeit (Jahre)
Kleines Laufwasserkraftwerk	40–100	knapp 14 Monate
Grosses Laufwasserkraftwerk	100–200	
Windkraftwerk	10–50	7–16 Monate (Leistung 1 MW, mittlere Jahresgeschwindigkeit 4.5–5.5 m/s)
Photovoltaik-Anlage	2–8	70–100 Monate (Leistung 5 KWp (Dachanlage), polykristallines und amorphes Silicium)

Tabelle 13 Quelle: Website Energie-Fakten.

Literatur

- BAFU Faktenblatt (unveröffentlicht):** Faktenblatt Wasserkraft und Pumpspeicher der KoKo Energie, Version 07.04.2011.
- BAFU 2009:** Unsere Energiezukunft – Szenarien. Umwelt 2/2009, Magazin des Bundesamtes für Umwelt, 2009.
- BAFU/BFE/ARE 2011:** Empfehlung zur Erarbeitung kantonaler Schutz- und Nutzungsstrategien im Bereich Kleinwasserkraftwerke.
- BAFU 2012:** Wasserstrategie (noch in Arbeit).
- BFE 2012a:** Stärkung der Stromdrehzscheibe Schweiz und der Versorgungssicherheit. Bericht des Bundesrates in Erfüllung des Postulates 09.3468 der UREK-N vom 11. Mai 2009. Bundesamt für Energie 18.04.2012.
- BFE 2012b:** Wasserkraftpotenzial der Schweiz. Abschätzung des Ausbaupotenzials der Wasserkraftnutzung im Rahmen der Energiestrategie 2050. Bundesamt für Energie, 4. Juni 2012.
- BFE 2008:** Leitfaden. Behandlung der für die Erfassung von Herkunftsnachweisen und bei der Stromkennzeichnung relevanten Elektrizitätsmenge beim Einsatz von Pumpen. Bundesamt für Energie, 1. April 2008.
- BFE 2011:** Grundlagen für die Energiestrategie des Bundesrates; Frühjahr 2011 – Aktualisierung der Energieperspektiven 2035 (energiewirtschaftliche Modelle). Prognos
- BWG 2004:** Sicherheit der Talsperren. Alle Risiken unter Kontrolle. Bundesamt für Wasser und Geologie, Aquaterra, Nr 2, 2004.
- DLR/IFEU/WI 2004:** Ökologisch optimierte Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland. DLR/IFEU/Wuppertal Institut für Klima, Umwelt und Energie, Stuttgart/Heidelberg/Wuppertal 2004.
- Eawag 2011:** Wasserkraft und Ökologie – Faktenblatt. Abteilung Oberflächengewässer, A. Wüest, Eawag: Das Wasserforschungs-Institut des ETH-Bereichs.
- Eawag 2011b:** Wasserkraftnutzung und Restwasser; Restwasserstrecken und Sanierungsbedarf. Dokumentation Eawag Kastanienbaum, Januar 2011. <http://www.eawag.ch/forschung/surf/schwerpunkte/project/wasserkraft>. (Zugriff am 30.1.2012).
- EBP 2010:** Kleinwasserkraft - zusätzliches Potenzial an ökologisch geeigneten KEV-Standorten. Schlussbericht, 16. November 2010. Ernst Basler + Partner AG im Auftrag des WWF Schweiz.
- Econcept 2001:** VS 64: Ökologische (Teil A) und technisch/ökonomische (Teil B) Qualitäten der Wasserkraft. Verbandsschrift 64 des Schweizerischen Wasserwirtschaftsverbandes.
- ETH 2011** (Hrsg.): Energiezukunft Schweiz. Andersson G., Boulouchos K. und Bretschger L., Eidgenössische Technische Hochschule (ETH), Zürich. ^
- Flury K., Frischknecht R., Itten R. 2010:** Erkenntnisse aktueller Ökobilanzen zu Strom aus Wasserkraft. Stromtransport und Zulieferpumpen prägen die Bilanz. Technologie Wasserkraft, Bulletin 2/2012
- Frischknecht 2010:** Ökobilanz verschiedener Kraftwerktechnologien. Frischknecht R., ESU-Services GmbH, in Dossier Pusch Thema Umwelt 4/ 2010.
- Gagnon und van de Vate 1997:** Gagnon L, van de Vate JF. Greenhouse gas emissions from hydropower: the state of research in 1996. Energy Policy 1997.
- Hauenstein, Bonvin, et al. 1999:** Externe Effekte der Wasserkraftnutzung in der Schweiz. Verbandsschrift 60 des Schweizerischen Wasserwirtschaftsverbandes.
- Pacca, S. 2007:** Impacts from decommissioning of hydroelectric dams: a life cycle perspective. Climatic Change , Nr. 84, 281-294.
- ProClim/OcCC 2003:** Wasserkraft und Klimawandel – Vision 2030Climate Talk – Dialog zwischen Wissenschaft und Wirtschaft Tagungsunterlage 29. Oktober 2003.
- Raadal et al. 2011:** Life cycle greenhouse gas (GHG) emissions from the generation of wind and hydro power. Hanne Lerche Raadala, Luc Gagnonb, Ingunn Saur Modahla, Ole Jørgen Hanssena. Renewable and Sustainable Energy Reviews 15 (2011) 3417– 3422.

-
- Schälchli, Abegg+Hunzinger 2005:** Geschiebe und Schwebstoffproblematik in Schweizer Fliessgewässern, Zürich.
- Schweizer Talsperrenkomitee 2011:** Wasser regulieren und Nutzen. http://www.swissdams.ch/Dams/damtext/regularisation_d.asp Zugriff 31.1.2012).
- SWV 2011:** Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband: Klimawandel und Wasserkraft. Fachzeitschrift Wasser, Energie, Luft. 04-2011, 8. Dezember 2011.
- Website BFE:** Bundesamt für Energie BFE, Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation. www.bfe.admin.ch/themen/ (Zugriff am 11.10. 2012).
- Website Energie-Fakten:** Energieerntefaktoren bei der Erzeugung elektrischer Energie; Veröffentlicht: 6. Oktober 2005; Aktualisiert: 24. November 2005. <http://www.energie-fakten.de/html/erntefaktor.html> (Zugriff am 16.2.2012).
- Website WWF Schweiz:** www.wwf.ch/de/derwwf/themen/wasser/wasserkraft/ (Zugriff am 31.1.2012).
-

Energiestrategie 2050 – Umweltwirkungen Technologien

Beurteilungsblatt Technologie Nr. 2

Technologietyp: **Windkraft**

Varianten: **Kleinanlagen < 250 KW_{el} (entspricht ca. einer Masthöhe von 30 m)**
Grossanlagen > 250 KW_{el} (entspricht ca. einer Masthöhe von über 60 m)

Es kann zudem unterschieden werden zwischen Einzelanlagen und Windparks (mindestens drei Anlagen, die in einer gemeinsamen Anordnung stehen).

Version/Datum: Version 4, 11. Oktober 2012

Verfasser/in: J. Reutimann (INFRAS)

Wichtigste Umweltwirkungen

- Windenergieanlagen verändern das Landschaftsbild. Dadurch können sie die Ästhetik der Landschaft, des Vermächtnis- und Erlebniswertes charakteristischer Landschaften und den Wert der Landschaft als touristisches Kapital und Standortfaktor beeinträchtigen, was sich negativ auf die landschaftliche Vielfalt auswirkt. Die Auswirkungen von Grossanlagen und Windparks sind zwar proportional geringer, aber immer noch gross. Die Möglichkeit zur Optimierung der Standortwahl und Einpassung im Gelände nimmt mit zunehmender Grösse ab.
- Für Fledermäuse und Vögel können Windenergieanlagen ein Risiko sein (Kollision, Veränderungen des Lebensraums, Zugrouten). Im Einzelfall sind die Auswirkungen stark abhängig vom Standort der Anlagen.

Wirkung:

- positiv
- negativ
- ■ stark
- ■ schwach

in Phase:

- H: Herstellung
- R: Realisierung, Bau
- B: Betrieb
- S: Stilllegung, Rückbau

	Naturräume, Artenvielfalt			Klima	Schadstoffe, Lärm, NIS			Risiken	
	Biodiversität	Landschaftliche Vielfalt	Flächennutzung		Treibhausgase/ fossile Energie	Schadstoffe	Lärm und optische Immissionen	Nicht ionisierende Strahlung	Naturerfahren
Kleinanlagen < 250 KW _{el}	B	R, B	R, B			B			
Grossanlagen > 250 KW _{el}	B	R, B	R, B			B			
Windparks (>3 Anlagen)	B	R, B	R, B			B			

Beurteilung

Biodiversität

Windkraftanlagen (Klein- und Grossanlagen sowie Windparks) haben während dem Betrieb je nach Standort schwache bis starke negative Auswirkungen auf die Biodiversität. Im Durchschnitt werden sie als schwach negativ eingeschätzt; im Einzelfall sind sie stark vom Standort der Anlagen abhängig.

Aufgrund der hohen Geschwindigkeiten der Rotorblätter stellen Windkraftanlagen für Vögel und Fledermäuse eine nicht erkennbare Gefahr dar, einerseits durch direkte Kollision, andererseits durch die Luftdruckverhältnisse im Umfeld der mit Überschallgeschwindigkeit drehenden Rotorspitzen. Zudem können wegen der Veränderung des Lebensraums durch die Windkraftanlagen und ihrer Begleitinfrastruktur (Freileitungen, Erschliessungen etc.) zusätzliche negative Effekte entstehen. Die wichtigsten Einflussfaktoren von Windkraftanlagen, welche sich auf die Biodiversität auswirken, sind die Anzahl der Turbinen und die Grösse der „gefährlichen Fläche“ der Rotorblätter. Eine generelle Aussage zur Einschätzung der Risiken für die Biodiversität ist nicht möglich, da diese stark standortabhängig und in der Schweiz noch zu wenig Erfahrungen bezüglich der real existierenden Risiken d.h. Kollisionen während des Betriebs vorhanden sind.

Schädliche Einflüsse auf die Bestände von empfindlichen Vogelarten können sehr gravierend sein, namentlich in Kerngebieten national prioritärer Arten, in Zugkorridoren, Winterquartieren und Jagdgebieten. An gewissen Standorten können sie unter Umständen sogar das Überleben von sehr seltenen, vom Aussterben bedrohten Arten gefährden (z.B. Auerhuhn und Grossvögel wie Uhu, Steinadler und Storch) (BFE/BAFU/ARE 2010). Windkraftanlagen können zudem durch Beunruhigungen und Scheuchwirkungen das Zug-, Rast- und Brutverhalten bestimmter Vögel beeinträchtigen. Sie meiden z.B. bei der Rastplatzwahl Windkraftanlagen im Umkreis von bis zu 500 Metern. Betroffen sind insbesondere Vogelarten, die eine hohe Empfindlichkeit gegenüber anthropogenen Lebensraumveränderungen haben; „Kulturfolger“ hingegen reagieren kaum (DLR/IFEU/WI 2004). Die Zugkorridore der Vögel wurden bis dato oft unvollständig erhoben; es fehlten flächendeckende Kenntnisse dazu (BAFU Faktenblatt). Demnächst wird allerdings eine Karte der Zugvögelkorridore der Schweiz in Hinblick auf die Kollisionsrisiken mit Windkraftanlagen publiziert, welche die Vogelwarte Sempach im Auftrag des BAFU erarbeitete.

Die Mortalität von Fledermäusen aufgrund von Windkraftanlagen (insb. Kleinanlagen) wird auf fünf bis elf Individuen pro Turbine und Jahr geschätzt, was dem im internationalen Vergleich beobachteten Durchschnitt entspricht (BAFU 2009). Da Fledermäuse sehr lange leben (bis 30 Jahre) und ihre Reproduktionsrate sehr gering ist (durchschnittlich ein Junges pro Jahr), können Windkraftanlagen auf Fledermausbestände langfristig negative Auswirkungen haben. Bei der Auswahl der Standorte von Windkraftanlagen sind daher Kolonien, Wanderkorridore, wichtige Jagdgebiete und Flugstrassen von Fledermäusen zu beachten (BFE/BAFU/ARE 2010).

Um der Gefährdung von Vögeln und Fledermäusen Abhilfe zu verschaffen, wird angewandte Forschung betrieben, welche die Steuerung von Windkraftanlagen während der Flugzeit ermöglichen soll. Solche vordefinierten zeitlichen Betriebseinschränkungen während hohen Kollisionsrisikoperioden werden schon in Deutschland, Frankreich und den USA angewendet. Durch die bessere Erforschung von Flug- und Zugverhalten der Vögel und Fledermäuse kann zudem ermöglicht werden, dass diese bei der Planung von Windkraftanlagen berücksichtigt werden können (BAFU Faktenblatt).

Landschaftliche Vielfalt

Die Wirkungen auf die landschaftliche Vielfalt, die durch Windkraftanlagen (alle Typen) in der Realisierung-/Bau- und der Betriebsphase erfolgen, werden als stark negativ eingestuft. Die Auswirkungen von Grossanlagen und Windparks sind zwar proportional geringer als diejenigen von Kleinanlagen, aber immer noch gross, umso mehr als deren landschaftliche Integration schwieriger ist.

Windkraftanlagen verändern das Landschaftsbild. Dadurch können sie die Ästhetik der Landschaft, des Vermächtnis- und Erlebniswertes charakteristischer Landschaften und den Wert der Landschaft als touristisches Kapital und Standortfaktor beeinträchtigen,

was sich negativ auf die landschaftliche Vielfalt auswirkt (BAFU Faktenblatt).

Aus Sicht des Landschaftsschutzes wird eine Konzentration von wenigen Grossanlagen und Windparks generell besser beurteilt als viele Kleinanlagen, die notwendig sind, um die gleiche Energie zu liefern (Figur 1). Beeinträchtigungen der landschaftlichen Vielfalt sind schwierig zu charakterisieren. Hauptargument ist die Schutzwürdigkeit der betroffenen Landschaften (inventarisierte Naturschutzgebiete) und wie die Windenergieanlage darin eingebettet wird. Grosse Windkraftanlagen und Windparks können auch touristisch attraktiv sein und damit die landschaftliche Vielfalt positiv beeinflussen.



Figur 1 (Quelle: Suisse éole).

Zur Prüfung der Landschaftsverträglichkeit ist eine auf den Standort bezogene Beurteilung notwendig. Bei sehr grossen Windkraftanlagen mit einer installierten Leistung von mehr als 5 MW wird eine solche im Rahmen der obligatorischen UVP erfolgen. Ein Handbuch zur Beurteilung von UVP-pflichtigen Windenergieanlagen ist in Erarbeitung (BAFU 2012b).

Aufgrund der Bundesgesetzgebung ergeben sich Kriterien für die Realisierung von Windkraftanlagen in Inventaren nationaler Bedeutung (vgl. Moorlandschaftsverordnung, Hochmoorverordnung, Flachmoorverordnung, Nationalparkgesetz, Pärkeverordnung etc.) und anderweitig geschützten Landschaften (BFE/BAFU/ARE 2010).

Für das Waldareal (inkl. Wytweiden) gilt gemäss Waldgesetzgebung (WaG) allgemein ein Rodungsverbot. Sind jedoch bestimmte Bedingungen kumulativ erfüllt, können Ausnahmen bewilligt werden (vgl. Art. 5 WaG).

Weitere Ausschlusskriterien für die Realisierung von Windkraftanlagen obliegen der Regelungskompetenz der Kantone. Sie ergeben sich aufgrund der Bundesinventare, der zugehörigen Regelungen und weiterer bundesrechtlicher Bestimmungen (BFE/BAFU/ARE 2010).

Flächennutzung

Die Flächennutzung durch Realisierung/Bau und Betrieb von Windkraftanlagen (alle Typen), wird als schwach negativ eingestuft.

Die unmittelbare Fläche, die beim Betrieb von Windenergieanlagen beansprucht wird, ist relativ gering; der Mastfuss einer Anlage hat einen Durchmesser von ca. 6 bis 7 Metern. Da die Einzelanlagen in Windparks in riesigen Abständen zueinander (ca. 600 m in Hauptwindrichtung) stehen, kann die Fläche dazwischen praktisch ohne Einschränkung landwirtschaftlich genutzt werden (lediglich der Zugang für die Wartung muss gewährleistet werden) (BFE/BAFU/ARE 2010). Die Anlagen sind aber aus Montagegründen an grössere Erschliessungsinfrastrukturen (Strassen, Stromnetze) gebunden (BAFU Faktenblatt, DLR/IFEU/WI 2004). Zum Erschliessen der Anlagen muss in der Realisierungs-/Bauphase eine Fläche von ca. 2000–4000 m² eingeebnet und planiert werden (Bau von Strasse, Fundament etc.). Wegen Eisschlaggefahr ist zudem die Winternutzung der Umgebung eingeschränkt (z.B. Langlaufloipen).

Der notwendige Flächenbedarf für die Errichtung einer Windkraftanlage ist im Vergleich zur tatsächlich genutzten Fläche der Anlagen relativ gross. Damit sich die Windräder nicht gegenseitig den Wind wegnehmen, müssen sie mit einem Abstand von mindestens achtfachem Rotordurchmesser in Hauptwindrichtung und einem vierfachen Rotordurchmesser in allen übrigen Windrichtungen aufgestellt werden (Faustregel für Flächenbedarf $F = 8d * 4d = 32d^2$) (SFV 2009, Franz 2011). Eine typische

„Standardanlage“ in der Schweiz mit einer Leistung von 1 MW und einem Rotordurchmesser von 80 m kann heute und in Zukunft bei ca. 1500 Vollaststunden pro Jahr 1.5 Mio. kWh produzieren. Daraus ergibt sich ein Flächenbedarf von ca. 0.11 bis 0.14 m² pro kWh (resp. 7.3 kWh/m² (eigene Berechnung) bis 8.8 kWh/m² (Franz 2011)).

Treibhausgase und fossile Energieträger

Die Treibhausgasemissionen, die bei Herstellung, Bau und Entsorgung von Windkraftanlagen (alle Typen) entstehen, werden als vernachlässigbar eingestuft.

Typische spezifische THG-Emissionen von Windkraftanlagen in der Schweiz liegen bei weniger als 10 g bis 20 g CO₂-e pro kWh (BAFU 2009) und werden voraussichtlich sehr niedrig bleiben oder sogar abnehmen (auf ca. 10 g CO₂-e pro kWh) (ETH 2011). Bei Grossanlagen (> 250 kW_{el}) betragen typische Emissionen ca. 9–10 CO₂-e pro kWh (Guerzuraga et al. 2012; Martinez 2006; siehe Tabelle 12). Für Kleinanlagen (< 250 kW_{el}) wird angenommen, dass die spezifischen THG-Emissionen etwas höher liegen (Tabelle 12). Charakteristisch für die Windkraftnutzung ist, dass die standort-spezifischen Windverhältnisse einen grossen Einfluss auf den kumulierten Stromertrag einer Anlage und damit auf die spezifischen CO₂-Emissionen haben (DLR/IFEU/WI 2004).

Anlagentyp	Typische Treibhausgasemissionen (g CO ₂ -e/kWh)	Datenquelle
Kleinanlagen < 250 kW _{el}	Annahme: 10–20 g CO ₂ -e/kWh	-
Grossanlagen > 250 kW _{el}	9–10 g CO ₂ -e/kWh	Guerzuraga et al. 2012; Martinez 2006
Windkraft Schweiz allgemein	< 10–20 g CO ₂ -e/kWh, tendenziell abnehmend (ETH 2011)	BAFU 2009; ETH 2011

Tabelle 14

Über den gesamten Lebenszyklus von Windenergieanlagen verursacht die Bereitstellung der Infrastruktur (Herstellungsphase) ca. 84% bis 95% der THG-Emissionen (Guerzuraga et al. 2012, Raadal et al. 2011, DLR/IFEU/WI 2004). Ausschlaggebend dafür ist insbesondere die CO₂- und energieintensive Stahlproduktion für den „Turm“ der Anlagen, gefolgt von der Beton- und Gusseisenproduktion (Raadal et al. 2011). Die THG-Emissionen der Realisierungs-/Bauphase betragen ca. 7% und kommen durch Transport und Errichtung der Anlagen zustande. Die THG-Emissionen der Betriebsphase, die durch Wartung und Unterhalt entstehen, betragen ca. 4% und die Stilllegungs-/Rückbauphase verursacht ca. 3% der THG-Emissionen.

Die CO₂-Bilanz der Windkraftanlagen ist stark abhängig von der CO₂-Intensität des Energiemixes, der für Herstellung der Komponenten verwendet wird. Auch die eingesetzten Materialien und der damit verbundene Energieaufwand für die Herstellung (z.B. hoher Anteil an Beton anstelle von Stahl im Turm) und die Art der Entsorgung (Recycling unter Energieeinsparung oder nicht) haben einen Einfluss auf die CO₂-Bilanz von Windkraftanlagen (DLR/IFEU/WI 2004: 88, Guerzuraga et al. 2012).

Schadstoffe

Die Schadstoffemissionen, die während dem gesamten Lebenszyklus von Windkraftanlagen (alle Typen) entstehen, werden als vernachlässigbar bewertet. Sie betragen ca. 40–70 mg NO_x und 10–50 mg PM₁₀ (BAFU 2009).

Lärm und optische Immissionen

Die Lärmemissionen und optischen Immissionen (insbesondere Schattenwurf), die beim Betrieb von Windkraftanlagen (alle Typen) entstehen, können die Bevölkerung in ihrem Wohlbefinden stören und werden daher als schwach negativ eingestuft.

Lärm: Die Lärmemissionen von neuen Windkraftanlagen müssen im Rahmen der Vor-

sorge soweit begrenzt werden, als dies technisch und betrieblich möglich sowie wirtschaftlich tragbar ist und dass die von der Anlage allein erzeugten Lärmimmissionen die Planungswerte von Anhang 6 LSV nicht überschreiten (Art. 7 Abs.1 LSV). Die Vollzugsbehörde gewährt Erleichterungen, soweit die Einhaltung der Planungswerte zu einer unverhältnismässigen Belastung für die Anlage führen würde und ein überwiegendes öffentliches, namentlich auch raumplanerisches Interesse an der Anlage besteht (Art. 7 Abs. 2 LSV) (BAFU Website 2012).

Die Ermittlung und Beurteilung der Lärmimmissionen sind im Rahmen des Bewilligungsverfahrens durchzuführen. Die Vollzugsbehörde hält in ihrem Entscheid über die Erstellung der Anlage die zulässigen Lärmimmissionen fest (Art. 37a Abs. 1 LSV). Steht fest oder ist zu erwarten, dass die Lärmimmissionen einer Anlage von den im Entscheid festgehaltenen Immissionen auf Dauer wesentlich abweichen, so trifft die Vollzugsbehörde die notwendigen Massnahmen (Art. 37a Abs. 2 LSV). Bei der Gewährung von Erleichterungen ist insbesondere das Interesse der Bevölkerung am Schutz vor Lärm mit dem Interesse am Betrieb der Windkraftanlagen abzuwägen. Zu berücksichtigen ist dabei die Lärmbelastung und die Anzahl Betroffener sowie das Interesse an der Energieerzeugung. Der Vollzug dieser Vorschriften obliegt den Kantonen.

Die Geräuschemissionen von Windenergieanlagen sind von der Ausgestaltung der Anlage (Anzahl und Anordnung der Einzelanlagen), der Topographie des Geländes und der meteorologischen Verhältnisse (Windgeschwindigkeit, Windrichtung) abhängig (DLR/IFEU/WI 2004; BFE/BAFU/ARE 2010). Kritisch ist in den meisten Fällen der Lärm in der Nacht, da die Bevölkerung in dieser Zeit am empfindlichsten auf Lärm reagiert (Störung des Schlafes). Die Belastungsgrenzwerte sind daher in dieser Zeit am strengsten. Kritisch sind die Lärmemissionen der Windkraftanlagen zudem, wenn sie die Umgebungsgeräusche übertreffen, was insbesondere bei mittleren Windgeschwindigkeiten der Fall sein kann.

Nach dem Bau einer Anlage sind in der Regel weder an der Quelle noch auf dem Ausbreitungsweg konstruktive Massnahmen zur Reduktion der Immissionen möglich. Als nachträgliche Massnahmen kommt einzig eine Leistungsreduktion in Frage, woraus Produktionseinbussen resultieren.

Für die Berechnung der Potenziale für Windkraft (Energiestrategie 2050) ging Meteotest (2012) von einem Radius von 300 bis 1000 Metern um Siedlungen (exkl. Einzelgebäude, Höfe) aus, um den Lärmschutz zu berücksichtigen.

Schattenwurf: Befinden sich Windkraftanlagen in der Nähe von Wohngebieten, kann der Schattenwurf von Windkraftanlagen von Anwohnern als starke Störung empfunden werden (Stressor). Schattenwurf ist abhängig von Wetter und Sonnenstand. In Deutschland darf nach dem Bundesimmissionsschutzgesetz der Schattenwurf von Windkraftanlagen nicht länger als 30 Stunden pro Jahr (theoretisch, das entspricht etwa 8 Stunden pro Jahr tatsächlich) und 30 Minuten am Tag auf ein Wohnhaus wirken. Um diese Dauer nicht zu übertreffen, werden Schattenzähler installiert, und bei Überschreitung müssen die Windkraftanlagen abgeschaltet werden, solange ihr Schatten auf den Immissionspunkt fällt (Landesumweltamt 2002).

Lichtreflexe: Bei starkem Sonnenschein können durch Reflexion des Sonnenlichts an den Rotorblättern hervorgerufenen Lichtblitze („Disco-Effekt“) störend wirken. Auch dieser Effekt hängt stark vom Wetter und dem Sonnenstand ab und tritt an einem bestimmten Ort nur kurzfristig auf. Durch den Einsatz reflexionsarmer Materialien können Intensität und Häufigkeit von Lichtreflexen reduziert werden (DLR/IFEU/WI 2004).

Störfall

Die Umweltwirkungen aufgrund von Störfällen bei Windkraftanlagen wurden in allen Lebensphasen als neutral bewertet.

Windkraftanlagen können durch herabfallende Eisstücke eine Gefährdung darstellen. Dadurch können im Winter andere Nutzungen eingeschränkt werden. Im Einzelfall werden Risikoanalysen durchgeführt und Massnahmen eingeleitet, um die Gefährdung zu minimieren. Technische Verbesserungen z.B. durch beheizbare Rotorblätter wer-

den vorangetrieben.

Ausgangslage, Bedeutung der Technologie	Die Windkraftproduktion hat derzeit in der Schweiz eine geringe Bedeutung. Im Jahr 2008 betrug sie 0.0185 TWh. Dies entspricht 0.03% des Inlandstrombedarfs und ca. 1.6% des Potenzials der Windkraft in der Schweiz (BAFU Faktenblatt).
Aussichten, Zukünftige Entwicklungspotenziale	<p>Das Ausbaupotenzial der Windkraft in der Schweiz ist beschränkt und limitiert aufgrund der dichten Besiedlung und der sich daraus ergebenden Nutzungskonflikte (Natur- und Landschaftsschutz) in den übrigen Räumen. Die Schweiz eignet sich deswegen vor allem für eine Nutzung der Windkraft im Rahmen von konzentrierten, kleinen und mittleren Windparks prioritär in Gebieten, die schon heute gut erschlossen sind. Zudem können Einzelmastanlagen in Industriezonen geeignet sein. Die Errichtung von isolierten Einzelanlagen auf der grünen Wiese hingegen wird aus Gründen des Landschaftsschutzes als nicht sinnvoll erachtet.</p> <p>Berücksichtigt man aus wirtschaftlichen Gründen nur Standorte, an denen Windgeschwindigkeiten von über 4.5 m/s im Jahresmittel herrschen und die eine gewisse Planungssicherheit gewährleisten, resultiert ein Potenzial von 1500 Windkraftwerken (SATW 2006). Dabei lassen sich zwei Anlagentypen unterscheiden: Windparks, die gesamthaft 1.2 TWh erzeugen könnten, sowie Einzelanlagen an spezifischen Standorten, die gesamthaft weitere 2.8 TWh Strom pro Jahr liefern könnten (SATW 2006).</p> <p>Die Berechnung der Energiepotenziale für Wind- und Sonnenenergie von Meteotest (2012) spricht von einem Potenzial von 2 bis 3.7 TWh pro Jahr für den nachhaltigen Ausbau von Windkraft (BAFU 2012a). Auch andere Quellen (Energietrialog Schweiz 2009, Barmettler et. al. 2011, VSE 2011, ETH 2011) betrachten einen Beitrag der Windkraft zwischen 2 und 4 TWh bis 2050 als technisch und ökonomisch realistisch. Ab etwa 2035 wird eine Sättigung der zusätzlichen Windkraft (wie auch bei der Wasserkraft und Biomasse) erwartet, weil die technischen Potenziale grundsätzlich limitiert sind (ETH 2011).</p>
Chancen	Aus klima- und energiepolitischer Sicht ist es sinnvoll, dass die Windkraft in der Schweiz einen Beitrag zur dezentralen Stromversorgung aus erneuerbaren Energien leistet. Zwei Drittel der Windkraftproduktion fällt im Winterhalbjahr an, weshalb die Windkraft die Solarenergie ergänzt, welche im Sommerhalbjahr mehr produziert. Die kostendeckende Einspeisevergütung fördert die Planungsaktivität für Windkraftanlagen in der Schweiz (BAFU Faktenblatt).
Risiken	<p>Die Schweiz ist nur an einzelnen Orten für den Ausbau der Windkraft geeignet. Ein grundsätzlich existierendes, moderates Potenzial wird durch ungünstige Witterung an exponierten Orten und teilweise durch schwierige Zugänglichkeit geschmälert. Andererseits werden Windenergieanlagen in Zukunft von weltweiten Skalierungseffekten bei Investitions- und Betriebskosten profitieren (neue Materialien, getriebelose Systeme, automatische Überwachung, robusteres Betriebsverhalten in Starkwindsituationen usw.) (ETH 2011, BAFU Faktenblatt).</p> <p>Die Stromproduktion durch Windkraftwerke ist fluktuierend; sie hängt stark von den vorherrschenden Windverhältnissen ab. Dadurch benötigt sie geeignete Energiespeicher (z. B. Pumpspeicherwerke oder neue Speichertechnologien), damit die elektrische Energie zu jeder Zeit entsprechend der jeweiligen Nachfrage abgerufen werden kann (ETH 2011).</p> <p>Der Ausbau der Windkraft kann zu Zielkonflikten zwischen verschiedenen Umweltzielen und Nutzungsansprüchen führen, z.B. dem Ziel der Stromversorgung aus erneuerbaren Energien und Ansprüchen des Natur- und Landschaftsschutzes. Dadurch könnten der Ausbau der Windkraft gedämpft werden (BAFU Faktenblatt, ETH 2011). Aufgrund der im internationalen Vergleich geringen und namentlich wenig kontinuierlichen Windstärken ist davon auszugehen, dass das Verhältnis zwischen den negativen Auswirkungen auf Natur und Landschaft und dem Ertrag in der Schweiz ungünstiger ist als in anderen Ländern.</p> <p>Derzeit besteht eine sehr hohe Planungsaktivität bei Windkraftanlagen. Die Kantone müssen die Koordination der Standortplanung wahrnehmen. Es besteht das Risiko,</p>

das die Koordination überhastet und unzureichend sichergestellt wird, wodurch die Akzeptanz der Windkraftanlagen gefährdet werden könnte.

**Handlungsbedarf/
Handlungsansätze**

Die angewandte Forschung kann Lösungsansätze für die Minimierung der Gefährdung von Vögeln und Fledermäusen durch Windkraft liefern (BAFU Faktenblatt). Zudem kann eine sorgfältige, grossräumige und koordinierte Planung zur Akzeptanz und räumlichen Optimierung der Windnutzung beitragen.

**Instrumente zur
Minimierung der
Umweltwirkungen**

Das Konzept Windkraft Schweiz, welches BFE/BAFU/ARE mit kantonalen Fachstellen und NGO zusammen erarbeitet haben, stellt eine Basis für die Akzeptanz von Windkraftanlagen in der Schweiz dar, die von allen Seiten geschätzt wird und gleichzeitig Planungssicherheit bietet. Die Empfehlungen zur Planung von Windkraftanlagen erweitern das Konzept und bieten eine Planungsgrundlage für die kantonalen Richt- und Nutzungspläne (BAFU Faktenblatt). Im Sinne einer Positivplanung sollen die aus Umweltsicht unproblematischen erneuerbaren Energien zugebaut werden können. Als Instrument bieten sich hierzu Gebietsausscheidungen (Massnahme 36 ES 2050) an, die unter Berücksichtigung der Umweltsicht auf Stufe Bund und Kantone durchgeführt werden und die Kantone allenfalls zu einer Ausscheidung verpflichten. Ein Handbuch mit Mindestanforderungen an UVP-Berichte zu Windkraftanlagen wird demnächst erarbeitet und veröffentlicht. Windkraftanlagen mit einer installierten Leistung von mehr als 5 MW sind der UVP unterstellt (BAFU Faktenblatt).

Weitere Aspekte*Ökobilanz*

Die Gesamtumweltauswirkungen (Umweltbelastung an der Steckdose), ausgedrückt in Umweltbelastungspunkten (UBP) gemäss der Methode der ökologischen Knappheit 2006, liegen für eine durchschnittliche Schweizer Windkraftanlage bei ca. 90 UBP pro kWh (Frischknecht 2010). Die grössten Belastungen entstehen im Umweltkompartiment Luft (Frischknecht 2010).

Nicht erneuerbare Ressourcen

Windkraftanlagen, die mit Permanentmagnetgeneratoren ausgestattet sind, geraten in die Kritik, weil sie grosse Mengen seltener Erden (Neodyn) verwenden. Der Abbau von seltenen Erden wird fast ausschliesslich in China praktiziert – Engpässe sind nicht auszuschliessen. Zudem ist er aus Umweltsicht problematisch (grosse Mengen an Rückständen aus dem Bergbau, die giftige Abfälle enthalten) (Öko-Institut 2011). Die Permanentmagnettechnik zeichnet sich durch einen hohen Wirkungsgrad, besondere Zuverlässigkeit und geringen Wartungsaufwand aus. In der Schweiz sind derzeit keine solchen Anlagen in Betrieb.

Es gibt ein Projekt, welches zum Ziel hat Stahl durch Holzkonstruktion bei Windenergieanlagen zu ersetzen. Dadurch würde nicht nur die graue Energie vermindert, sondern auch die Konstruktion vergünstigen machen (Website Timber Tower).

Literatur

- BAFU 2012:** UVP-Handbuch Modul 7.1 Methodologische UVP-Empfehlungen: Berücksichtigung der Auswirkungen der Windenergieanlagen auf Vögel und Fledermäuse.
- BAFU 2009:** Unsere Energiezukunft – Szenarien. Umwelt 2/2009, Magazin des Bundesamtes für Umwelt, 2009.
- BAFU Faktenblatt (unveröffentlicht):** Faktenblatt Windenergie der KoKo Energie, Version 28.9.2009.
- BAFU 2010: Positionspapier** Windenergie. Bundesamt für Umwelt, März 2010.
- BAFU Website 2012:** Ermittlung und Beurteilung von Industrie- und Gewerbelärm. Info-Blatt zu Lärm von Windkraftanlagen: www.bafu.admin.ch/laerm/1-0312/10313/-10325/index.html?lang=de; (Seite besucht am 23.4.2012).
- Barmettler et. al. 2011:** F. Barmettler, N. Beglinger, Ch. Zeyer: Cleantech Energiestrategie, Juni 2011, www.Swisscleantech.ch
- BFE 2011:** Grundlagen für die Energiestrategie des Bundesrates; Frühjahr 2011 – Aktualisierung der Energieperspektiven 2035 (energiwirtschaftliche Modelle).
- BFE/BAFU/ARE 2010:** „Empfehlungen zur Planung von Windkraftanlagen. Die Anwendung von Raumplanungsinstrumenten und Kriterien zur Standortwahl“. K. Gilgen und A. Sartoris, IRAP Institut für Raumentwicklung der HSR Hochschule für Technik Rapperswil im Auftrag des Bundesamts für Energie, des Bundesamts für Umwelt und des Bundesamts für Raumentwicklung. Ittigen, 2010.
- DLR/IFEU/WI 2004:** Ökologisch optimierte Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland. DLR/IFEU/Wuppertal Institut für Klima, Umwelt und Energie, Stuttgart/Heidelberg/Wuppertal 2004.
- Energie Dialog Schweiz 2009:** Energie-Strategie 2050, Impulse für die schweizerische Energiepolitik; Grundlagenbericht. www.energiediolog.ch/cm_data/Grundlagenbericht.pdf.
- ETH 2011** (Hrsg.): Energiezukunft Schweiz. Andersson G., Boulouchos K. und Bretschger L., Eidgenössische Technische Hochschule (ETH), Zürich.
- Franz 2011:** Was sagt die Praxis? Stromversorgung: Ausbau der erneuerbaren Energien. Markus Franz, Leiter Engineering Axpo Holz + Energie AG, Glattbrugg. Umwelt-Perspektiven 5 – 2011, Illnau.
- Frischknecht 2010:** Ökobilanz verschiedener Kraftwerktechnologien. Frischknecht R., ESU-Services GmbH, in Dossier Pusch Thema Umwelt 4/ 2010.
- Guezuraga B., Zauner R., Pölz W. 2012:** Life cycle assessment of two different 2 MW class wind turbines. Renewable Energy, Nr. 37, 37-44.
- INFRAS/TNC 2010:** Stromeffizienz und erneuerbare Energien – wirtschaftliche Alternativen zu Grosskraftwerken. INFRAS/TNC Consult AG, Mai 2010.
- Landesumweltamt 2002:** Optische Immissionen von Windenergieanlagen Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen, Essen 3/2002.
- Martinez E., Sanz F., Pellegrini S., Jiménez E., Blanco J. 2009:** Life cycle assessment of a multi-megawatt wind turbine. Renewable Energy, Nr. 34,667-673.
- Meteotest 2012:** Energiestrategie 2050 - Berechnung der Energiepotenziale für Wind- und Sonnenenergie, im Auftrag des BAFU, 34 S.
- Raadal et al. 2011:** Life cycle greenhouse gas (GHG) emissions from the generation of wind and hydro power. Hanne Lerche Raadala, Luc Gagnonb, Ingunn Saur Modahla, Ole Jørgen Hanssena. Renewable and Sustainable Energy Reviews 15 (2011) 3417– 3422.
- SATW 2006:** Schweizerische Akademie der Technischen Wissenschaften SATW, Road Map Erneuerbare Energien Schweiz – Eine Analyse zur Erschliessung der Potenziale bis 2050, 2006.
- SFV 2009:** WindstromPotenzial - Windstrom von 8% der Land- und Forstwirtschafts-Flächen entspricht dem derzeitigen Jahresstromverbrauch Wolf von Fabeck, 24.03.2009, aktualisiert am 27.08.2009, http://www.sfv.de/artikel/Potenzial_der_Windkraft_an_land.htm.
- Tressner B. 2007:** Technologievergleich solarthermischer Stromerzeugung inklusive globalökonomischer und globalökologischer Bewertung. Diplomarbeit Fachhoch-

schule Köln, Köln.

Vogelwarte Sempach 2012: Konfliktpotenzialkarte Windenergie – Vögel Schweiz – eine Orientierungshilfe für die Windenergieplanung.

VSE 2011: Positionspapier des VSE zur laufenden energiepolitischen Debatte, http://www.strom.ch/uploads/media/VSE_Position-Energiepolitik_22-07-2011_01.pdf

Website Timber Tower: <http://www.timbertower.de/index.php?id=31&L=1> [Seite besucht am 17. Juli 2012]

Energiestrategie 2050 – Umweltwirkungen Technologien

Beurteilungsblatt Technologie Nr. 3

Technologietyp: **Sonnenenergie**
 Varianten: **Solarthermische Produktion, gebäudebezogen**
Photovoltaik, gebäude- und infrastrukturbezogen
Photovoltaik, Freiflächenanlagen
 Version/Datum: Version 4, 11. Oktober 2012
 Verfasser/in: J. Reutimann (INFRAS)

Wichtigste Umweltwirkungen

- Der Flächenverbrauch von Photovoltaik-Freiflächenanlagen während der Realisierungs-/Bau-Phase und der Betriebsphase ist gross. Sie entsteht durch die Überdeckung, Versiegelung und Verdichtung von Boden durch die Modulflächen sowie durch den Bau von Zufahrtswegen und Infrastruktur (Leitungen etc.).
- Die Möglichkeiten der Kombination mit anderen Flächennutzungen sind aus technischen (Sicherheit) und wirtschaftlichen Gründen begrenzt, aus Umweltsicht wären sie jedoch sinnvoll.
- Freistehende Anlagen können die landschaftliche Vielfalt stark negativ beeinträchtigen. Besonders in Natur- und Kulturlandschaften mit hohem Identifikations- und Erholungswert sowie charakteristischem Eigenwert und Schönheit können sie als Fremdkörper und wegen unerwünschter Spiegelungen störend wirken. Sollten Freiflächenanlagen einen nennenswerten Beitrag an die Produktion liefern, sind viele und grosse Anlagen nötig, und der Effekt auf die Landschaft ist entsprechend schwerwiegend. Dasselbe gilt für die indirekten Auswirkungen der Flächennutzungskonkurrenzen.
- Gebäude- und infrastrukturbezogene Anlagen beeinträchtigen die landschaftliche Vielfalt im Durchschnitt nur schwach, in Einzelfällen können die Auswirkungen auf den Ortsbild- und Denkmalschutz jedoch hoch sein. Insgesamt wird aber die Reduktion des Potenzials durch diese Faktoren auf maximal rund 5% der potenziellen (Dach- oder Anlage-)Flächen geschätzt.
- Integrierte und angebaute Anlagen haben nur schwache Auswirkungen auf die Umwelt.

Wirkung:
 positiv
 negativ
 stark
 schwach
in Phase:
 H: Herstellung
 R: Realisierung, Bau
 B: Betrieb
 S: Stilllegung, Rückbau

	Naturräume, Artenvielfalt		Klima	Schadstoffe, Lärm, NIS			Risiken	
	Biodiversität	Landschaftliche Vielfalt		Flächennutzung	Schadstoffe	Lärm	Nicht ionisierende Strahlung	Naturgefahren
Solarthermische Produktion		R, B						
Photovoltaik gebäudebezogen		R, B		H, R, S	H, S			
Photovoltaik, Freiflächen-Anlagen	R, B	R, B	R, B	H, R, S	H, S			

Beurteilung

Biodiversität

Die Wirkung von freistehenden Photovoltaikanlagen auf die Biodiversität wird als schwach negativ eingestuft. Die Wirkung von gebäude- und infrastrukturbezogener Photovoltaik (PV) und solarthermischer Produktion auf die Biodiversität ist vernachlässigbar klein.

Bei freistehenden PV-Anlagen an Standorten von hohem ökologischen Wert (z.B. auf trockenen, mageren, sonnenexponierten Flächen, sind Konflikte mit der Erhaltung der Biodiversität möglich (BAFU Faktenblatt). In erster Linie werden dadurch Flächenkonkurrenzen mit anderen Nutzungen akzentuiert und damit der Druck auf diese für die Biodiversität wichtigen Flächen nochmals verstärkt. Durch Bodenversiegelung, Bodenumlagerung und Aufbau der Module kann die vorhandene Vegetationsdecke geschädigt werden, bis hin zum Verlust von Vegetationsstandorten. Möglicherweise werden auch angrenzende (verbleibende) Biotopstrukturen durch den Baubetrieb beeinträchtigt. Durch Bodenverdichtung können sich die abiotischen Standortfaktoren (z.B. zunehmende Staunässe) und in der Folge die Vegetationszusammensetzung verändern. Die Überdeckung des Bodens durch PV-Anlagen führt zu Beschattung und Veränderung des Bodenwasserhaushaltes, was Veränderungen des Artenspektrums und den Verlust lichtliebender Arten zur Folge haben kann. Zudem führt die Überdeckung des Bodens zu einer Veränderung der Habitateignung für wärme- und trockenheitsliebende Arten wie Heuschrecken und Wildbienen (Grünnewig 2007) und standorttypische Lebensraumstrukturen (Kraut- und Strauchschicht) werden beeinträchtigt oder verdrängt.

Grosse Anlagen können zum Verlust von Rast- und Nahrungshabitaten für Zugvögel führen und zum Verlust von Bruthabitaten für empfindliche Wiesenvogelarten, welche in der offenen Landschaft brüten. Wird die Anlage eingezäunt, führt dies zum Entzug von Lebensraum für Gross- und Mittelsäuger, zur Isolation und Fragmentierung von Tierpopulationen und Habitatsstrukturen sowie zu Verlust und Veränderung von faunistischen Funktionsbeziehungen durch Barrierewirkung der Anlage (z.B. Trennung von Teillebensräumen wie Tageseinstände, Äsungsflächen oder Jagdgebiete und Wildwechseln) (Grünnewig 2007). Moduloberflächen können wegen der Polarisation des reflektierten Lichts eine Lockwirkung entwickeln, die zur Verwechslung der Module mit Wasserflächen führt und eine Gefahr für Insekten und Vögel darstellt (Grünnewig 2007).

Zum Schutz der Biodiversität und der Landschaft (z.B. Trockenwiesen- und Weiden) gelten insbesondere für freistehende PV-Anlagen die Bestimmungen des Natur- und Heimatschutzgesetzes (NHG) bezüglich Arten- und Lebensräume. Für gebäude- und infrastrukturbezogene Photovoltaikanlagen sind insbesondere die Bestimmungen des NHG bezüglich Landschafts-, Ortsbild- und Denkmalschutz von Bedeutung.

Bei integrierten und angebauten Anlagen können im Einzelfall die Lebensräume gewisser Tierarten (z.B. Fledermäuse) beeinträchtigt werden, was spezielle Massnahmen erfordert (BAFU Faktenblatt).

Landschaftliche Vielfalt

Die Wirkung auf die landschaftliche Vielfalt von freistehenden Photovoltaikanlagen während der Bau- und der Betriebsphase wird als stark negativ eingestuft. Gebäude- und infrastrukturbezogene Anlagen werden im Durchschnitt als schwach negativ eingestuft. Die Auswirkungen auf landschaftliche Vielfalt, den Ortsbild- und Denkmalschutz sind stark vom Standort der einzelnen Anlagen und deren technischer Ausgestaltung abhängig.

Bei freistehenden PV-Anlagen sind Konflikte mit der Erhaltung des Landschaftscharakters und des Landschaftsbildes möglich. Photovoltaikanlagen können als Fremdkörper und wegen unerwünschter Spiegelungen in Natur- und Kulturlandschaften mit hohem Identifikations-, Erholungs- und Freizeitwert sowie charakteristischem Eigenwert und Schönheit störend wirken (BAFU Faktenblatt), und damit die landschaftliche Vielfalt beeinträchtigen. Zum Schutz der Landschaft gelten bei freistehenden PV-Anlagen die Bestimmungen des Natur- und Heimatschutzgesetzes (NHG).

Bei gebäude- und infrastrukturbezogenen PV- und Solarthermieanlagen sind Konflikte mit der Erhaltung von Ortsbildern oder bezüglich einzelner Bauten mit dem Denkmalschutz möglich (BAFU Faktenblatt); ca. 5% des Gebäudebestandes ist nach Schätzung des Bundesamtes für Kultur betroffen. Die Anlagen können zum Verlust von landschafts- und ortsbildprägenden oder kulturhistorisch bedeutenden Elementen führen (Grünnewig 2007). Eine Voraussetzung bei der Errichtung von gebäude- und infrastrukturbezogenen Anlagen ist daher die Berücksichtigung der Bestimmungen des Ortsbildschutzes (Inventar der Ortsbilder von nationaler Bedeutung ISOS; Art. 5ff NHG) und des Denkmalschutzes (Erhaltung des Charakters und der Materialisierung von Einzelbauten oder an Anlagen wie Brücken etc. (vgl. die jeweiligen kantonalen Grundlagen) (BAFU Faktenblatt).

Flächennutzung

Die Wirkung auf die Flächennutzung und den Flächenverbrauch von Photovoltaik-Freiflächenanlagen während Realisierungs-/Bau- und Betriebsphase wird als stark negativ eingestuft. Die Wirkung von gebäude- und infrastrukturbezogenen Solarthermie- und Photovoltaikanlagen auf die Flächennutzung und den Flächenverbrauch wird als vernachlässigbar eingestuft.

Die Flächennutzung von Freiflächenanlagen kommt in der Realisierungs-/Bauphase sowie in der Betriebsphase zustande. Sie entsteht durch die Überdeckung von Boden durch die Modulflächen, durch Versiegelung und Teilversiegelung von Boden beim Bau von Fundamenten, Betriebsgebäuden, geschotterten Zufahrtswegen/Baustellenstrassen sowie Lager- und Abstellflächen, durch Bodenverdichtung beim Einsatz schwerer Bau- und Transportfahrzeuge sowie durch Bodenumlagerung und -durchmischung aufgrund der Verlegung von Erdkabeln (Grünnewig 2007).

Die genutzte Fläche pro Produktionseinheit (kWh) hängt von den meteorologischen Bedingungen des Standortes (Sonneneinstrahlung, Temperatur), dem Neigungswinkel (nachgeführte oder fixe Installation) und dem Wirkungsgrad der PV-Module ab.

Die Fläche von Photovoltaik-Panels beträgt pro 1 kWp installierte elektrische Leistung resp. 1000 kWh pro Jahr produzierte elektrische Energie (ausgehend von einem in unseren Breitengraden typischen Energieertrag von 1000 kWh/kWp) ca. 6 bis 7 m² PV-Modulfläche (dies entspricht 150–160 kWh/m² Modulfläche) (Website Swissolar). Für einen optimalen Ertrag sollten die Panels auf einer südorientierten Fläche mit etwa 30° Neigung angebracht werden und wegen Schattenwurf einen gewissen Abstand zueinander einhalten. Im leistungsstärksten deutschen Solarpark Lieberose in Brandenburg beträgt der Flächenbedarf (Boden) pro Quadratmeter PV-Modul 3.24 m² (entspricht ca. 160 kWh/m² geteilt durch 3.24) (Franz 2011). Die Produktion von Elektrizität in optimalen PV-Freiflächenanlagen hat daher einen Landflächenbedarf von ca. 0.02 m²/kWh (resp. einen flächenspezifischen Energieertrag von ca. 50 kWh/m²). Wird mit einem Energieertrag von nur 860 kWh/kWp gerechnet (was gemäss Solarstromstatistik für Netzverbundanlagen im Jahr 2009 durchschnittlich war), beträgt der Flächenbedarf auf ca. 0.03 m²/kWh (flächenspezifischer Energieertrag: ca. 30 kWh/m²). Für den deutschen Solarpark Lieberose in Brandenburg wurde ein flächenspezifischer Energieertrag von 29 kWh/m² berechnet (Franz 2011).

Gebäude- und infrastrukturbezogene Anlagen haben keinen Landflächenbedarf, allerdings müssen geeignete Dach- oder Infrastrukturflächen vorhanden sein. Berechnungen für die Stadt Zürich zeigten, dass ca. 45% der Dachflächen für Photovoltaik geeignet sind (Gutschner und Novak 1998). Die Produktion von 1 kWh elektrischer Energie pro Jahr aus gebäudebezogener Photovoltaik benötigt eine Dachfläche von ca. 0.01 m² (flächenspezifischer Energieertrag: 100 kWh/m²) (Novak 2010). Gemäss Fallstudien von Freiburg und Zürich kann mit heutiger Technologie auf den bebauten Flächen 16% bis 50% des elektrischen Energiebedarfs durch Photovoltaik gedeckt werden (Novak 2007, aus BAFU Faktenblatt).

Treibhausgase und fossile Energieträger

Die Treibhausgasemissionen, die bei der Herstellung, der Realisierung und der Stilllegung von Photovoltaikanlagen anfallen, werden als schwach negativ eingestuft. Die Treibhausgasemissionen von solarthermischen Anlagen werden als vernachlässigbar eingestuft.

Die spezifischen CO₂-Emissionen von Photovoltaikanlagen während des gesamten Lebenszyklus liegen momentan bei 40 bis 100 g CO₂-e pro kWh, je nach Technologie und Sonneneinstrahlung (Tabelle 12) (ETH 2011, BAFU 2009, BWK 2007). Im Vergleich mit andern neuen erneuerbaren Technologien für die Stromerzeugung liegen die Treibhausgasemissionen damit um den Faktor 2–10 mal höher (ETH 2011). Die Treibhausgasemissionen der solarthermischen Stromproduktion betragen ca. 10 g bis 20 g CO₂-e pro kWh (BAFU 2009). Damit liegen sie im Bereich der spezifischen Emissionen der Wasserkraft.

Die grauen CO₂-Emissionen der Photovoltaik sind nicht inhärent mit der Technologie gekoppelt, da sie stark abhängig sind von den bei der Produktion Module verwendeten Energiequellen. Mittel- bis langfristig werden für Photovoltaikanlagen Treibhausgasemissionen von 10–20 g CO₂-e pro kWh erwartet (ETH 2011, BWK 2007). Grund für Verbesserungen sind laufend reduzierte Materialumsätze und verbesserte Fertigungsverfahren, Steigerung der Modulwirkungsgrade sowie der vermehrte Einsatz der Anlagen in Lagen mit höherem jährlichem Eintrag, zusammen mit der fortschreitenden Entkarbonisierung des weltweiten Energiesystems (ETH 2011, BWK 2007).

Anlagentyp	Typische Treibhausgasemissionen (g CO ₂ -e/kWh)	Datenquelle
Solarthermische Produktion	10–20 g CO ₂ -e pro kWh	BAFU 2009
Photovoltaik, gebäudebezogen	Tiefer als bei Freiflächenanlagen	
Photovoltaik, Freiflächenanlagen	Höher als bei gebäude- und infrastrukturbezogenen Anlagen (wegen Einsatz von zusätzlichem Material für Gerüste und Wechselrichter)	
Photovoltaik allgemein	40–150 g CO ₂ -e pro kWh	ETH 2011, BAFU 2009, BWK 2007
Windenergie Schweiz allgemein	< 10–20 g CO ₂ -e/kWh, tendenziell abnehmend (ETH 2011)	BAFU 2009; ETH 2011
Wasserkraft Schweiz allgemein	< 10 g CO ₂ -e/kWh	ETH 2011

Tabelle 15

Lebenszyklusanalysen von Photovoltaik zeigen: Die Herstellung der Anlagen ist für die Gesamtemissionen entscheidend, die Emissionen während der Betriebs- und der Entsorgungsphase machen hingegen nur ca. 5% bis 8% der Gesamtemissionen aus (BWK 2007). Im Rahmen der Herstellung entfällt der Grossteil der Emissionen auf die Fertigung der Photovoltaikmodule. Gemäss einer Metaanalyse (BWK 2007) liegt ihr Anteil an den Gesamtemissionen zwischen 55% und 90%, wobei bei kristallinen Modulen die Prozessschritte der Siliziumgewinnung und der Wafer-Herstellung infolge ihres hohen elektrischen Energiebedarfs am stärksten zu den Emissionen beitragen. Die Wafer-Dicke und das Verfahren der Siliziumgewinnung sind hierbei die entscheidenden Einflussfaktoren auf die CO₂-Emissionen pro Produktionseinheit. Ein weiterer wichtiger Einflussfaktor ist der Energiemix, der für die Herstellung der PV-Module ver-

wendet wird. Je nach Fertigungsland kann dieser bei polykristallinen Solarmodulen zu Unterschieden von bis zu einem Faktor 2.6 führen¹³ (BWK 2007). Zudem spielt auch die gesamte Energieproduktion durch die PV-Anlagen im Betrieb eine wichtige Rolle. Sie ist abhängig von den Standortbedingungen (Sonneneinstrahlung, Temperatur, Neigewinkel)¹⁴ sowie der Lebensdauer der Anlage (derzeit ca. 25 Jahre) (BWK 2007).

Dünnschichtmodule benötigen gegenüber mono- und polykristallinen Silizium-Solarmodulen weniger Energie bei der Herstellung (und weisen geringere Produktionskosten auf), sie haben aber auch geringere Wirkungsgrade. Um die gleiche Energie zu produzieren, ist daher eine grössere Fläche notwendig als bei kristallinen Modulen. Wird eine grössere Fläche verbaut, wird auch mehr Material für die Installation (Verkabelung und Montagesystem) benötigt, was sich wiederum negativ auf die spezifischen THG-Emissionen auswirkt.¹⁵

Bei Freiflächenanlagen wird mehr Material für die Herstellung und Installation von (Stahl-)Gerüsten benötigt und es müssen in der Regel Zufahrtswege geschaffen werden. Daher wird angenommen, dass die spezifischen THG-Emissionen in der Regel höher liegen als bei gebäudeintegrierten Anlagen.

Schadstoffemissionen/Immissionen

Die Schadstoffemissionen, die bei der Herstellung und der Stilllegung von PV-Anlagen (alle Typen) entstehen, werden als schwach negativ bewertet. Die Schadstoffemissionen von Solarthermieanlagen werden als vernachlässigbar tief eingestuft.

Über den gesamten Lebenszyklus verursachen Photovoltaikanlagen Emissionen von 40–300 mg NO_x und 60–120 mg PM10 pro kWh. Solarthermieanlagen verursachen 50–70 mg NO_x pro kWh, die PM10-Emissionen sind unbekannt (BAFU 2009).

Der grösste Teil der Emissionen fällt bei der Produktion der Solarmodule im Ausland an. Die in der Schweiz anfallenden Emissionen werden als nicht relevant eingestuft. Die Emissionen aus der Produktion von PV- resp. Solarthermiemodulen sind abhängig von Typ und Technologie der Module sowie auch vom Herstellungsprozess und den bei der Produktion eingehaltenen Qualitäts-, Gesundheits- und Sicherheitsstandards. Die Prozesse, die dabei zur Anwendung kommen, sind vergleichbar mit denjenigen der Elektronikindustrie, die schon seit Jahren mit ähnlichen Stoffen arbeitet.

Photovoltaikmodule enthalten eine grosse Bandbreite an Stoffen, die teilweise ein human- bzw. ökotoxisches Potenzial aufweisen (z.B. Kupfer, Blei, Cadmium, Silber und Selen). Als Hauptrohstoff für kristalline Solarzellen dient Polysilizium. Die Herstellungskette von Silizium über Reinstsilizium bis zum fertigen Solarmodul ist aus ökologischer Sicht problematisch. Es wird teilweise mit hochgiftigen chemischen Substanzen gearbeitet, das technologische Aufbereitungsverfahren ist aufwändig und energieintensiv. Bei der Produktion von Reinstsilizium entsteht ein hochgiftiges Nebenprodukt, Siliziumtetrachlorid, welches eine spezielle Entsorgung verlangt (Power Shift 2011). Zudem wird bei kristallinen Photovoltaikmodulen eine fluorhaltige Rückseitenfolie verwendet, die teilweise als Sondermüll betrachtet wird. Eine Verbrennung ist aufgrund des Fluors und aufgrund von halogenorganischen Verbindungen problematisch (Santer 2004).

Dünnschicht-Photovoltaikmodule werden teilweise auf Basis von Cadmium-Tellurid (CdTe) hergestellt – eine stabile Verbindung der beiden Elemente Cadmium und Tellur mit Halbleitereigenschaften (PWC 2011). Es gibt zwar bisher kaum klinische Studien über Cadmiumtellurid, d.h. über die Wirkung der Verbindung auf die Gesundheit ist wenig bekannt. Die beiden Einzelsubstanzen Cadmium und Tellur werden aber gemäss der Gefahrstoffdatenbank der Länder (GDL) als giftig eingestuft. Cadmium-

¹³ PV-Module aus Schweden und Frankreich weisen eher tiefe, solche aus Italien und Deutschland eher hohe Werte auf (BWK 2007).

¹⁴ Die Emissionen für Standorte in Mitteleuropa sind um etwa den Faktor 1.7 höher als in Südeuropa (BWK 2007).

¹⁵ Ein grösserer Materialaufwand schlägt sich in höheren Kosten nieder. Demnach ist die Dünnschichttechnologie für Installationen auf der freien Fläche nur gegenüber kristallinen Modulen konkurrenzfähig, wenn deren Stückkosten um ca. 0.3 Euro/Wp günstiger sind (Experteninterview Pius Hüssler).

Verbindungen sind generell giftig, sie schädigen vor allem Nieren und Nerven (Welt online 2010). Bei unsachgemässer Entsorgung können solche Solarzellen giftig sein (BAFU Faktenblatt/Sander 2004).

NIS und Lärm

Die Nichtionisierende Strahlung (NIS), die durch Photovoltaikanlagen entsteht, wird in allen Lebensphasen als neutral bewertet. Durch Solarthermieanlagen entsteht keine NIS.

Solarzellen selbst erzeugen Gleichspannung und senden somit keine elektromagnetischen Wellen aus. Der Wechselrichter wandelt die Gleichspannung in Wechselspannung um und speist die Energie ins Stromnetz ein. Dadurch entsteht NIS. Diese ist bei gebäudebezogenen Anlagen in unmittelbarer Nähe von Menschen ein Thema. Die Stärke der NIS aus PV-Anlagen liegt allerdings weit unter den Grenzwerten, wodurch sie von der Fachwelt als relativ unkritisch betrachtet wird. Sie ist vergleichbar mit alltäglichen Emissionen. Durch bauliche Massnahmen kann NIS begrenzt werden. Solche Massnahmen gehören im Normalfall zur guten Ausführung bei der Installation der Anlagen.

Die bei Freiflächenanlagen entstehende NIS wird als unkritisch erachtet, da die Anlagen in genügender Distanz zu Wohngebieten stehen.

Naturgefahren

Die Wirkungen von freistehenden PV-Anlagen auf Naturgefahren werden als vernachlässigbar eingestuft. Bei gebäudebezogenen Anlagen sind keine Wirkungen bekannt.

Wenn Solaranlagen auf bestehende Schutzbauten vor Naturgefahren montiert werden, so wird die innere wie die äussere Statik (durch Schaffung von zusätzlichen Verbindungen und durch andere Belastungsfälle) verändert (BAFU Faktenblatt). Aus diesem Grund muss bei Solaranlagen auf Schutzbauten gegen Naturgefahren die Statik frühzeitig sorgfältig überprüft werden. Die Installation von Photovoltaikanlagen auf Schutzbauten kann durchaus sinnvoll sein, weil dadurch keine zusätzliche Fläche in Anspruch genommen wird und bereits eine gewisse Erschliessung (exkl. Stromnetz) für den Unterhalt und Aufbau besteht.

Störfall

Die Umweltwirkungen, die durch Störfälle in der Betriebsphase von PV- und Solarthermieanlagen (alle Typen) verursacht werden, werden als neutral bewertet.

Brände können als Störfälle bei PV- und Solarthermieanlagen auftreten. Der Brandfall bei gebäudeintegrierten Anlagen, bei dem das Gebäude in Mitleidenschaft gezogen werden kann, verläuft in der Regel gravierender als bei Freiflächenanlagen, bei denen sich ein Brand meist auf die Anlage selbst beschränkt.

Ein Brand kann durch die Anlage selbst verursacht werden, z.B. wenn Kontakte korrodieren, was zur Funkenbildung führen kann, oder zu hohe Temperaturen erreicht werden, die den Brand auslösen. Massnahmen auf baulicher Seite (fachgerechte Montage), thermische Optimierungen (die Anlage darf nicht beliebig heiss werden) sowie eine entsprechende Wartung der Anlagen können den Brandfall verhindern. Die Brandrisiken, die durch gebäudeintegrierte PV- und Solarthermieanlagen entstehen, sind jedoch nicht hoch und vergleichbar mit denjenigen, die durch andere technischen Installationen am Gebäude entstehen.

Die teilweise giftigen Stoffe in Photovoltaikmodulen sind im Verbund enthalten und können nicht ohne weiteres aus den Modulen austreten. Nur wenn die Module stark beschädigt werden, besteht die Möglichkeit einer Umweltpollution (Ökopol 2004).

Aus Dünnschichtzellen, die teilweise auf Basis des giftigen Cadmiums (Cadmium-Tellurid-Module) hergestellt werden, könnten im Brandfall giftige Stoffe entweichen. Diese stellen allerdings keine grosse Gefahr dar. 2011 bestätigte das Bayerische Landesamt für Umwelt, dass Cadmium-Tellurid-Solarmodule selbst im Falle eines Brandes keine Gefahr für die umliegende Nachbarschaft und Allgemeinheit darstellen (Bayerisches Landesamt für Umwelt 2011).

Ausgangslage, Bedeutung der Technologie

Rund 50'000 **solarthermische Anlagen** zur Brauchwassererwärmung oder Heizungsunterstützung sind in der Schweiz bereits installiert, und die Nachfrage wächst um jährlich bis zu 30 Prozent (BAFU 2009). Solarwärme ist mit jedem anderen Energieträger ideal kombinierbar. Solarthermisch/elektrische CSP-Kraftwerke (CSP für Concentrated Solar Power) zur Erzeugung von Strom können in der Schweiz nicht wirtschaftlich eingesetzt werden (Website BFE) und wurden daher in diesem Faktenblatt nicht berücksichtigt. Als Importquelle könnten sie allenfalls in Zukunft eine Rolle spielen.

Derzeit installierte **Photovoltaikanlagen** in der Schweiz verfügten im Jahr 2010 insgesamt über eine Leistung von mehr als 100 MW und produzierten gut 80 GWh. Damit trugen sie nur zu einem sehr kleinen Teil (rund 0.04%) zur Schweizer Stromproduktion bei (Website BFE 2012). Der Photovoltaikmarkt in der Schweiz stagniert auf tiefem Niveau, aufgrund der zahlreichen KEV-Anmeldungen und den langen Wartezeiten (BAFU Faktenblatt). Die Solarstromproduktion ist stark fluktuierend und fällt zu ca. 70% im Sommer- und zu ca. 30% im Winterhalbjahr an.

Aussichten, Zukünftige Entwicklungspotenziale

Die Potenziale von Photovoltaik und Solarthermie sind gross. Solarthermie bietet mit der heutigen Technologie das Potenzial, mehr als 50% des Schweizer Warmwasserbedarfs und bis zu 25 % des Heizbedarfs bei gut isolierten Gebäuden zu decken (BAFU Faktenblatt). Bis 2070 könnte die Produktion von Solarwärme um das 16-Fache erhöht werden (BAFU Faktenblatt).

Die Produktion von Solarstrom (Photovoltaik) wird vermutlich bis 2050 stark ansteigen. In Anbetracht der Kostendegression und der vergleichsweise hohen Akzeptanz wird ein Ausbaupotenzial bis 2050 von zwischen 10 und 20 TWh erwartet (ETH 2011, Energie Dialog Schweiz 2009, Barmettler et al. 2011, VSE 2011). Das BAFU geht von einem Potenzial von 11.6 TWh bis 15.5 TWh/a aus.¹⁶ Im Unterschied zur Windkraft, Wasserkraft und Biomasseenergie wird bei der Photovoltaik keine Sättigung ab 2035 erwartet (ETH 2011).

Begrenzende Faktoren sind zurzeit die noch hohen, aber schnell sinkenden Gesteigungskosten und, bei einem starken Ausbau, die Beherrschung der fluktuierenden Erzeugung (ETH 2011) sowie ein möglicher Engpass der für die Produktion verwendeten seltenen Erden. Um die höheren Werte dieser fluktuierenden Stromproduktion abzufedern, wird der kosteneffiziente Einsatz von Speichern erforderlich sein. Die Schweiz verfügt jedoch mit ihren Stauseen und dem geplanten Ausbau der Pumpspeicherkraftwerke über beträchtliche Speicherkapazitäten (ETH 2011).

Chancen

Die Photovoltaik ist eine Technologie, die sich sehr schnell entwickelt. Ohne unerwartete Technologiedurchbrüche werden die Wirkungsgrade der Photovoltaik von derzeit ca. 16–17% (gute Module) kurz- bis mittelfristig bis über 20% steigen und mittel- bis langfristig auf ca. 25% (ETH 2011). Die Kostendegression war in den letzten Jahren eindrucksvoll, läuft weiter an (KEV-Tarif-Senkung), und Prognosen für den langfristigen Trend werden laufend günstiger. Dass verschiedene Technologien mit unterschiedlichen Merkmalen im Wettbewerb zueinander stehen, ermöglicht eine Risikostreuung (ETH 2011). Technische Entwicklungen laufen u.a. im Bereich der Ästhetik, was sich langfristig positiv auf das Potenzial auswirken kann.

Die im Sommer 2010 vom Parlament beschlossene Erhöhung der kostendeckenden Einspeisevergütung KEV wird ab 2013 mit einem maximalen Zuschlag auf 0.9 Rappen finanziert werden (bislang 0.6 Rp./kWh). Ab dann stehen somit neu rund 500 Millionen Franken anstelle von bislang 265 Millionen Franken für die Förderung von Strom aus erneuerbaren Energien zur Verfügung.

Risiken

Die Stromproduktion aus Solarenergie fluktuiert stark, weil sie von der Sonneneinstrahlung abhängt. Damit die elektrische Energie zu jeder Zeit entsprechend der jeweiligen Nachfrage abgerufen werden kann, sind geeignete Energiespeicher not-

¹⁶ Modulwirkungsgrad 15%–20%

wendig (z.B. Pumpspeicherwerke oder neue Speichertechnologien).

Der Ausbau von Photovoltaik und Solarthermie kann namentlich bei Freiflächen und im Bereich von geschützten Ortsbildern oder Baudenkmälern zu Zielkonflikten zwischen verschiedenen Umweltzielen und Nutzungsansprüchen führen, z.B. dem Ziel der Stromversorgung aus erneuerbaren Energien und Ansprüchen des Natur-, Landschafts- und Heimatschutzes. Solche Konflikte könnten den Ausbau der Photovoltaik dämpfen, sie fallen quantitativ aber kaum ins Gewicht (ca. 5% des Gebäudebestandes ist nach Schätzung des Bundesamtes für Kultur betroffen).

Handlungsbedarf/ Handlungsansätze	Primär soll das Potenzial der gebäude- und infrastrukturbezogenen Photovoltaik genutzt werden, freistehende Anlagen nur in Ausnahmefällen (vgl. Positionspapier ARE/BFE/BAFU/BLW 2012). Schätzungen (Metootest 2012) gehen von einem Potenzial der gebundenen Photovoltaik von rund einem Viertel des aktuellen Stromverbrauchs aus.
Instrumente zur Minimierung der Umweltwirkungen	<p>Bei freistehenden Anlagen gelten insbesondere die Bestimmungen des NHG zum Schutz der Biodiversität und der Landschaft (z.B. Trockenwiesen- und Weiden) (BAFU Faktenblatt).</p> <p>Im Sinne einer Positivplanung sollen die aus Umweltsicht unproblematischen erneuerbaren Energien zugebaut werden können. Als Instrument bieten sich hierzu Gebietsausscheidungen (vergl. Massnahme G16 der Energiestrategie ES 2050) an, die unter Berücksichtigung der Umweltsicht auf Stufe Bund und Kantone durchgeführt werden und die Kantone allenfalls zu einer Ausscheidung verpflichten.</p> <p>Energieberatungsstellen verfügen über Empfehlungen zur Nutzung der Solarenergie (PV) bei Gebäudesanierungen und Installation von Solaranlagen betreffend Gebäude bewohnender Tierarten (BAFU Faktenblatt).</p> <p>Solaranlagen, die gut in Bauten oder Anlagen integriert werden (z.B. wenn sie bereits im Baukonzept berücksichtigt sind), können zur Konfliktlösung hinsichtlich des Artes- und Lebensraumschutzes sowie des Landschaftsbildes beitragen (BAFU Faktenblatt).</p>
Weitere Aspekte	<p><i>Ökobilanz</i></p> <p>Die Gesamtumweltauswirkungen (Umweltbelastung an der Steckdose), ausgedrückt in Umweltbelastungspunkten (UBP) gemäss der Methode der ökologischen Knappheit 2006, liegen für eine durchschnittliche Schweizer Photovoltaikanlage bei ca. 180 UBP pro kWh. Die grössten Belastungen entstehen im Umweltkompartiment Luft (Frischknecht 2010).</p> <p><i>Nicht erneuerbare Ressourcen</i></p> <p>Für die Produktion von Dünnschicht-Photovoltaikmodulen werden seltene Erden verwendet (IFZ2009). Der Abbau von seltenen Erden ist fast ausschliesslich in China möglich – Engpässe sind nicht auszuschliessen. Zudem ist er aus Umweltsicht problematisch (grosse Mengen an Rückständen aus dem Bergbau, die giftige Abfälle enthalten) (Öko-Institut 2011).</p>

Literatur

- ARE/BFE/BAFU/BLW 2012:** Positionspapier freistehende Photovoltaik-Anlagen, 3.7.2012
- BAFU 2009:** Unsere Energiezukunft – Szenarien. Umwelt 2/2009, Magazin des Bundesamtes für Umwelt, 2009.
- BAFU 2010 (unveröffentlicht):** internes Faktenblatt Sonnenenergie (thermisch & elektrisch), Version 02.12.2010
- BAFU 2011:** Flyer Gebäudesanierungen: Vogel- und fledermausfreundlich. Umwelt-Diverses UD-1034-D
- Barmettler et. al. 2011:** F. Barmettler, N. Beglinger, Ch. Zeyer: Cleantech Energiestrategie, Juni 2011, www.Swisscleantech.ch
- Bayerisches Landesamt für Umwelt 2011:** Berechnung von Immissionen beim Brand einer Photovoltaik-Anlage aus Cadmiumtellurid-Modulen. www.lfu-bayern.de/luft/doc/pvbraende.pdf
- BFE 2011:** Grundlagen für die Energiestrategie des Bundesrates; Frühjahr 2011 – Aktualisierung der Energieperspektiven 2035 (energiewirtschaftliche Modelle). Prognos
- BMU 2007:** Tiefe Geothermie in Deutschland. Berlin.
- BWK 2007:** CO₂-Emissionen der Stromerzeugung. Ein ganzheitlicher Vergleich verschiedener Techniken BWK Bd. 59 (2007) Nr. 10. http://static.hallozukunft-blog.swisscom.ch/1323706031/co2-emissionen-der-stromerzeugung_01.pdf
- Deutsche Umwelthilfe (undatiert):** Vorteile und Fakten zur Photovoltaik. Solarlokal, Strom aus Sonne. Deutsche Umwelthilfe, Berlin. www.solarenner.de/cms/uploads/downloads/Daten_und_Fakten_zur_Solarenergie.pdf
- DLR/IFEU/WI 2004:** Ökologisch optimierte Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland. DLR/IFEU/Wuppertal Institut für Klima, Umwelt und Energie, Stuttgart/Heidelberg/Wuppertal 2004.
- Energie Dialog Schweiz 2009:** Energie-Strategie 2050, Impulse für die schweizerische Energiepolitik; Grundlagenbericht. www.energietriolog.ch/cm_data/Grundlagenbericht.pdf
- ETH 2011 (Hrsg.):** Energiezukunft Schweiz. Andersson G., Boulouchos K. und Bretschger L., Eidgenössische Technische Hochschule (ETH), Zürich.
- Franz 2011:** Was sagt die Praxis? Stromversorgung: Ausbau der erneuerbaren Energien. Markus Franz, Leiter Engineering Axpo Holz + Energie AG, Glattbrugg. Umwelt-Perspektiven 5 – 2011, Illnau.
- Frischknecht 2010:** Ökobilanz verschiedener Kraftwerktechnologien. Frischknecht R., ESU-Services GmbH, in Dossier Pusch Thema Umwelt 4/ 2010.
- Grünnewig, D 2007:** Naturschutz und Konflikte um Freiflächenanlagen - mit Planungsleitfaden alles im Griff?. Vortrag im Rahmen Workshop: Monitoring zur Wirkung des novellierten Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) auf die Entwicklung der Stromerzeugung, insbesondere der Photovoltaik-Freiflächen. Berlin.
- Gutschner und Novak 1998:** Das Photovoltaik-Potenzial im Gebäudepark der Stadt Zürich Zusammenfassung der Analyse des Flächenpotenzials und der wirtschaftlichen, technischen und rechtlichen Indikatoren Marcel Gutschner, Stefan Nowak Oktober 1998.
- IER/DLR/LEE/FFE 2004:** Lebenszyklusanalysen ausgewählter zukünftiger Stromerzeugungstechniken. Stuttgart/Bochum/München.
- Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung/Fraunhofer IST 2009:** Rohstoffe für Zukunftstechnologien. Einfluss des branchenspezifischen Rohstoffbedarfs in rohstoffintensiven Zukunftstechnologien auf die zukünftige Rohstoffnachfrage. Berlin/Karlsruhe.
- Meteotest, 2012:** Energiestrategie 2050 - Berechnung der Energiepotenziale für Wind- und Sonnenenergie, im Auftrag des BAFU, 34 S.

-
- Ökopol 2004:** Stoffbezogene Anforderungen an Photovoltaik-Produkte und deren Entsorgung. Umwelt-Forschungsplan, Endbericht. Hamburg/Leipzig.
- Öko-Institut 2011:** Hintergrundpapier Seltene Erden, Stand: Januar 2011. <http://www.oeko.de/oekodoc/1110/2011-001-de.pdf> (Seite besucht am 19. April 2012).
- Power Shift 2011:** <http://power-shift.de/> (Seite besucht im Oktober 2011).
- PWC 2010:** Die deutsche Photovoltaik-Branche am Scheideweg. Herausforderungen und Chancen für Unternehmen entlang der Wertschöpfungskette. Herausgegeben von PriceWaterhouseCoopers, von Dr. Peter Claudy, Michaela Gedes und Janosch Ondraczek, unter Mitarbeit von Eleonore Kleuters. Oktober 2010.
- Sander, K., Zangl, S., Reichmuth, M., Schröder, G. 2004:** Stoffbezogene Anforderungen an Photovoltaik-Produkte und deren Entsorgung. Endbericht Umwelt-Forschungs-Plan. Hamburg, Leipzig.
- SATW 2006:** Schweizerische Akademie der Technischen Wissenschaften SATW, Road Map Erneuerbare Energien Schweiz – Eine Analyse zur Erschliessung der Potenziale bis 2050, 2006.
- Tressner, B. 2007:** Technologievergleich solarthermischer Stromerzeugung inklusive globalökonomischer und globalökologischer Bewertung. Diplomarbeit Fachhochschule Köln, Köln.
- Tressner, B. 2007:** Technologievergleich solarthermischer Stromerzeugung inklusive globalökonomischer und globalökologischer Bewertung. Diplomarbeit Fachhochschule Köln, Köln.
- VSE 2011:** Positionspapier des VSE zur laufenden energiepolitischen Debatte, http://www.strom.ch/uploads/media/VSE_Position-Energiepolitik_22-07-2011_01.pdf
- Website BFE 2012:** Solarenergie. <http://www.bfe.admin.ch/> (Seite besucht am 13.2.2012).
-

Energiestrategie 2050 – Umweltwirkungen Technologien

Beurteilungsblatt Technologie Nr. 4a

Technologietyp: **Biomasse (ohne Holz)**

Varianten: **Industrielle/Gewerbliche Vergärungsanlagen
Landwirtschaftliche Biogasanlagen**

Industrielle und gewerbliche Vergärungsanlagen mit Verstromung und landwirtschaftliche Biogasanlagen mit Verstromung werden zusammen in einem Faktenblatt bewertet, da es sich im Grundsatz um die gleichen Technologien handelt. Nicht Bestandteil der Untersuchung waren Abwasserreinigungsanlagen.

Version / Datum: Version 2, 24. April 2012

Verfasser/in: C. Bieler (INFRAS)

Wichtigste Umweltwirkungen

- Durch die Verbrennung von Biogas haben Biogasanlagen grundsätzlich hohe Luftschadstoffemissionen, und durch die Vergärungsprodukte sehr hohe Ammoniakemissionen.

Wirkung:

 positiv
 negativ
 stark
 schwach

in Phase:
 H: Herstellung
 R: Realisierung, Bau
 B: Betrieb
 S: Stilllegung

	Naturräume, Artenvielfalt			Klima	Schadstoffe, Lärm, NIS			Risiken	
	Biodiversität	Landschaftliche Vielfalt	Flächennutzung	Treibhausgase/ fossile Energie	Schadstoffe	Lärm	Nicht ionisierende Strahlung	Naturgefahren	Störfall
Industrielle/gewerbliche Vergärungsanlagen		R, B	R, B	B	B				
Landwirtschaftliche Biogasanlagen		R, B	R, B	B	B				B

Beurteilung: Biodiversität

Die Wirkung der Vergärung von Hofdünger und von jeglichen Co-Substraten zwecks Herstellung von Biogas wird, bezogen auf die Schweiz, sowohl für landwirtschaftliche wie auch für industriell/gewerbliche Anlagen, als neutral bewertet.

Dies hat verschiedene Gründe: Zum einen ist der Anteil dieser Anlagen an der Primärenergieproduktion der Schweiz sehr klein, weshalb keine grösseren Nutzungsänderungen von Agrarflächen hin zum Anbau von Energiepflanzen stattfinden. Zum grössten Teil werden Hofdünger und Co-Substrate (v.a. biogene Abfälle) vergärt, was einer Zwischennutzung gleichkommt, die während des Betriebs keinen ersichtlichen Einfluss auf die Biodiversität aufweist. In der Bauphase ist durch die UVP-Pflicht ab 1'000 Tonnen Co-Substraten (UVPV Art. 21.2a) der Schutz der Biodiversität gewährleistet. Zur

Phase Entsorgung/Rückbau ist die Datenlage sehr dünn, allerdings sind infolge der eher kleinen Dimensionen der Anlagen und der verwendeten Baustoffe keine relevanten negativen Auswirkungen zu erwarten.

Da die Schweiz je nach Berechnungsart einen Selbstversorgungsgrad von rund 40–60% bei den Lebensmitteln hat, bedeutet jeder Anbau von Energiepflanzen eine Beeinträchtigung der Biodiversität: Entweder werden im In- oder im Ausland Flächen der Nahrungsmittelproduktion verdrängt, welche wiederum in natürlichen Lebensräumen Flächen verdrängen, oder aber der Anbau findet direkt auf bis anhin natürlichen Lebensraumflächen statt. Es gibt somit keinen für die Biodiversität unproblematischen Anbau von Energiepflanzen., In der Schweiz ist der Anbau von Energiepflanzen kein Thema (DLR 2004, BFE 2010). Global gesehen hätte ein solcher Anbau negative Folgen für die Biodiversität, falls die Nahrungsmittelproduktion konkurrenziert wird und Verlagerungsprozesse ins Ausland stattfinden.

Bei der Biogaserzeugung durch Hofdünger werden unerwünschte Stoffe wie z.B. organische Säuren während des Vergärungsprozesses weitgehend abgebaut, so dass die Gärgülle bei der Nutzung als Dünger pflanzenverfügbarer wird. Durch die grössere Homogenität und Dünnsflüssigkeit wird das Eindringen in den Boden erleichtert, genauso wie die Abschwemmung in Oberflächengewässer. Somit kann gesagt werden, dass die Qualität des Hofdüngers durch die Vergärung erhöht wird. Ob sich dies negativ oder positiv auf die Umwelt auswirkt, hängt einzig von der Ausbringung ab. Wenn ein Landwirt Standort, Zeitpunkt und Menge des auszubringenden Hofdüngers optimal abstimmt, wird die Auswirkung positiv ausfallen. Bei schlechter Abstimmung sind die Auswirkungen sogar stark negativ (z.B. Abschwemmung in Moore oder andere Biodiversität-Hotspots).

Landschaftliche Vielfalt

Die Umweltauswirkungen von Biogasanlagen auf die landschaftliche Vielfalt werden als schwach negativ bewertet.

Die primäre energetische Biomassenutzung kann zu einer Ausdehnung und Veränderung der landwirtschaftlichen Flächennutzung und zur Erhöhung der Bewirtschaftungsintensität beitragen (BAFU Faktenblatt). Voraussetzung für eine solche Veränderung der landwirtschaftlichen Flächennutzung infolge Biogasproduktion ist allerdings der Anbau von Energiepflanzen als Substrat, sogenannten NaWaRo (nachwachsende Rohstoffe). Da landwirtschaftliche Biogasanlagen in der Schweiz weitgehend mit Hofdünger und Co-Substraten betrieben werden (BFE 2011), ist die Wirkung der landwirtschaftlichen Biogasanlagen auf die landschaftliche Vielfalt zwar klein, aber nur schon durch den Eingriff in die Landschaft vorhanden. Das Gleiche gilt für den Bau von industriell/gewerblichen Anlagen.

Flächennutzung

Die Flächennutzung der Biogasanlagen in der Schweiz über den gesamten Lebenszyklus wird als schwach negativ bewertet.

Den grössten Teil der Flächennutzung verursacht der Bau der Anlage, inklusive Zufahrtsstrassen. Teile des Flächenverbrauchs während der Bauphase sind reversibel.

Treibhausgase und Fossile Energieträger

Die Umweltwirkungen im Klimabereich der landwirtschaftlichen Biogasanlagen und der industriell/gewerblichen Vergärungsanlagen werden in der Betriebsphase als positiv bilanziert.

Generell gilt, dass Mist und Gülle durch die Vergärung weiter abgebaut werden und somit weniger Methan in die Atmosphäre gelangt als im Falle der Lagerung ohne Vergärung. Da Methan ein mehrfach stärkeres Treibhausgas ist als CO₂, rechtfertigen diese Minderemissionen die positive Bewertung der Treibhausgasemissionen der landwirtschaftlichen Biogasanlagen in der Betriebsphase. Industriell/gewerblichen Biogasanlagen können diese Minderemissionen nicht angerechnet werden.

Ein landwirtschaftliche Biogasanlage kann im Blockheizkraftwerk vor Ort nur einen geringen Teil der erzeugten Wärme für die Heizung des Fermenters und eventuell eines

Wirtschaftsgebäudes nutzen. Der Gesamtwirkungsgrad beläuft sich damit auf ca. 45%, wovon der überwiegende Teil der Stromgewinnung (35%) zuzurechnen ist. Als Alternative zur Stromeinspeisung für grosse Anlagen bietet sich die Aufbereitung und Einspeisung des Biogases in ein Erdgasnetz dann an, wenn ein geringer Methanschluß (max. 1–3% Verlust) erreicht werden kann. In diesem Fall lohnt sich der Aufwand aus Klimagesichtspunkten, da die höhere Effizienz durch ein ans Erdgasnetz angeschlossenes Gaskombikraftwerk, welches bei guter Auslastung einen 60%-igen elektrischen Wirkungsgrad erreicht, genutzt werden kann. Es ist davon auszugehen, dass die Bandbreite des Methanschlußes, in Abhängigkeit der Technik, zwischen 2 und 10 Prozent liegt. Bei kleinen „Ein-Mann“ Anlagen dürfte der Methanschluß wohl grösser sein als bei grossen industriell/gewerblichen Vergärungsanlagen.

Die Klimabelastungen für die Produktion von Biomasse können für die Schweiz im Moment vernachlässigt werden, da die Anlagen mit biogenen Reststoffen gespeist werden, also mit Abfällen, die ohnehin anfallen (Baum 2007) und CO₂ neutral sind. Allerdings besteht dabei der ökonomische Konflikt zwischen dem mit steigender Anlagengrösse sinkenden spezifischen Aufbereitungsaufwand und der Leistungsgrösse dezentraler Biogasanlagen, welche das Problem des Transports der Biomasse mit sich bringen (Wuppertal 2005). Wenn die Grösse der Anlage nicht den in der Region anfallenden Mengen Substrat angepasst ist, wird ein relativ hohes Transportaufkommen durch Zulieferung oder Abtransport verursacht. Ein gewisses Transportaufkommen lässt sich allerdings auch bei passendem Standort nicht vermeiden. Die dadurch verursachten CO₂-Emissionen werden aber durch den positiven Effekt der tieferen Methanemissionen überlagert.

Durch die Nutzung der in landwirtschaftlichen Biogasanlagen und industriell/gewerblichen Vergärungsanlagen anfallenden Wärme können fossile Energieträger substituiert werden, die für die Gebäudeheizung genutzt werden. Nach der hier angewandten Methodik werden durch die Nutzung der anfallenden Wärme die THG-Emissionen anderer fossiler Wärmeerzeugungsanlage reduziert, ähnlich wie bei einer KVA mit Wärmenutzung.

Gesamthaft werden durch die Nutzung von Wärme und Strom aus landwirtschaftlichen Biogasanlagen und industriell/gewerblichen Vergärungsanlagen THG-Emissionen reduziert.

Schadstoff- und Geruchsemissionen/Immissionen

Die Schadstoffemissionen und -immissionen von industriell/gewerblichen werden als gering negativ und jene von landwirtschaftlichen Biogasanlagen werden als gross und negativ bewertet.

Die bei der Verbrennung anfallenden NO_x Emissionen liegen beim Biogas zwischen 500 und 700 mg pro kWh-el. Pro thermische kWh können die NO_x-Emissionen sogar noch höher liegen. Die PM₁₀- Emissionen solcher Anlagen liegen zwischen 30 und 100 mg/kWh (BAFU 2009b).

In der heutigen Tierhaltung sind grosse Güllelager die Regel. Diese sind u.a. für sehr grosse Umweltbelastungen in den Bereichen Ammoniak und Lachgas verantwortlich, da beim Lagern in der Gülle und in der Schwimmdecke Mineralisierungsprozesse stattfinden. Vor allem bei der Gülleausbringung kommt es zu bedeutenden Mehremissionen von schädlichen Gasen, (wie z.B. Ammoniak und Lachgas), da die vergorene Gülle weiter abgebaut wird und daher u. a. mehr mineralischer Stickstoff in Form von Ammonium (im Gleichgewicht mit Ammoniak) vorliegt. Zudem ist der pH-Wert um 0,5 bis 1 Einheit höher, was den Ammoniakgehalt der vergärten Gülle nochmals stark erhöht (Edelmann et al. 2001). Würde die Gülle noch länger in Sammelbecken oder Tanks gelagert, bevor sie ausgebracht wird, könnten mehr Schadstoffe aufgefangen werden. Auf diese Lagerung wird jedoch aus Kostengründen mehrheitlich verzichtet.

Aufgrund der hohen Geruchsstoffkonzentrationen in reinem Biogas stellt die direkte Freisetzung von Biogas eine Geruchsquelle dar, die von Anwohnern als besonders belästigend empfunden wird. Durch die Biogaserzeugung wird jedoch bei landwirtschaftlichen Betrieben die Gülle weniger geruchsintensiv. Als relevante Geruchsquellen haben sich die Anlieferung, die Biogasfreisetzung bei Betriebsstörungen, undichte Speichermembranen auf Fermentern und die Motorabgase herausgestellt. Mit steigendem

Methanschlupf erhöhen sich auch die Geruchsemissionen der Anlage (Liebich 2008, Baum 2007, DLR 2004).

Mit steigenden Energiepreisen und der Förderung durch die öffentliche Hand werden biogene Abfälle vermehrt als alternative Brennstoffe auf dem Markt nachgefragt. Es ist unklar, wie sich der Markt mit alternativen Brennstoffen entwickeln resp. wer die stärkste Marktposition haben wird und den höchsten Preis für biogene Abfälle bezahlen kann. Biogene Abfälle sind teilweise schon heute ein knappes Gut beispielsweise für Biogasanlagen (als Co-Substrat) oder die Zementindustrie. Die zu erwartende Nachfrage erhöht die Gefahr, dass auch schadstoffbelastetes Material in ungeeignete Verwertungs- oder Entsorgungsprozesse gerät (BAFU Faktenblatt).

NIS und Lärm

Weitere Emissionen wie NIS und Lärm werden als neutral bewertet. Die Lärmquellen bei diesen Anlagen bestehen zum einen aus der Anlieferung respektive dem Umschlag des Substrates, andererseits aus der Rotation des Generators des Blockheizkraftwerks. Mit betrieblichen Massnahmen (u.a. Fahrtenreduktion) und baulichen Massnahmen (u.a. spezielle Einhausung des BKHV) können diese Auswirkungen stark vermindert werden (Serafimova 2008).

Störfall

Das Risiko für relevante Störfälle im Betrieb wird angesichts der Grösse der Anlagen und der Menge des vergärten Substrats bei den industriell/gewerblichen Anlagen als vernachlässigbar bewertet. Bei landwirtschaftlichen Anlagen wird das Störfallrisiko während der Betriebsphase als schwach negativ bewertet, weil diese Biogasanlagen ein gewisses Risiko für Mensch und Umwelt (Explosion, Methanschlupf) bergen, wenn sie nicht konsequent nach klaren Qualitätsanforderungen geplant, gebaut und betrieben werden (BAFU Faktenblatt). Bei einer landwirtschaftlichen Ein-Mann-Anlage ist das Risiko eines längeren Betriebsunterbruchs mit unkontrolliertem Methanausstoss grösser als in einer industriell/gewerblichen Anlage. Unter anderem auch, weil landwirtschaftliche Anlagen aus Kostengründen selten eine Fackel installiert haben.

Ausgangslage, Bedeutung der Technologie

Biomasse, die als Substrat für die Biogasproduktion verwendet werden kann, fällt täglich als Abfall und Reststoffe an. Der Verwertung dieser Biomasse kommt eine sehr wichtige Rolle bei der Schliessung von Stoff- und Nährstoffkreisläufen, zum Recycling von anorganischen Nährstoffen und zur Verbesserung der Pflanzenverfügbarkeit des vergärten Substrates zu (erhöhte Bodenfruchtbarkeit). Im Rahmen einer Kaskadennutzung macht es Sinn, diese Biomasse zuerst energetisch zu verwerten, bevor sie ausgebracht wird, als sie direkt auszubringen oder zu kompostieren. Allerdings kann mit Biogas – auch bei einem gegenüber heute drastisch reduzierten Energieverbrauch – nur ein kleiner Bruchteil des Energiebedarfs gedeckt werden. Für einen substanziellen Anbau von Energiepflanzen fehlen Land wie auch Wasser, und er ist energetisch nicht sinnvoll, da die Umwandlung von Sonnenenergie via Pflanzen zu Biogas sehr ineffizient ist (Edelmann et al. 2001).

Seit 2005 nimmt die Anzahl der Biogasanlagen in der Schweiz stark zu. Trotzdem beträgt der Anteil der Stromproduktion in Biogasanlagen im Jahr 2010 am schweizerischen Endverbrauch weniger als 0.1% oder 0.1 TWh. Die Biomasse ist – nach der Wasserkraft – die zweitwichtigste einheimische erneuerbare Energiequelle, jedoch beträgt der Anteil des Biogases an der Biomassenenergie nur 4%, der grosse Rest ist Holzenergie (BFE 2011).

Nebst der Energieproduktion wird die Qualität des Hofdüngers verbessert, allerdings wird davon ausgegangen, dass die Anlagen in erster Linie aus energetischen Gründen und erst in zweiter Linie zur Verbesserung der Düngerqualität realisiert werden.

Aussichten, Zukünftige Entwicklungspotenziale

Die grössten ungenutzten Potenziale finden sich im Bereich Landwirtschaft (Ernterückstände, Hofdünger). Bei der energetischen Nutzung von Hofdünger ist die geringe Energiedichte (und damit die mangelhafte Anlagenrentabilität) eine Herausforderung. Im Bereich der Verwertung von biogenen Abfällen gibt es ebenfalls noch Optimierungspotenzial (BFE 2010). Das verbleibende nachhaltige nutzbare Potenzial der Bio-

Chancen

Landwirtschaftliche Biogasanlagen können einen Einfluss auf die nachhaltige Nutzung nicht erneuerbarer Ressourcen haben, indem z.B. durch die erhöhte Konzentration von Ammonium in den flüssigen Vergärungsprodukten und durch ihre erhöhte Düngereffizienz auf stickstoffhaltigen mineralischen Dünger verzichtet wird (DLR 2004). Das wird allerdings nur erfolgen, wenn die Düngungsnormen entsprechend angepasst werden (d.h. die Pflanzenverfügbarkeit des Stickstoffs in den vergärten Hof- und Recyclingdüngern in den GRUDAF entsprechend erhöht wird und die sogenannten „unvermeidbaren“ Verluste bei Lagerung und Ausbringung entsprechend der angepassten Technologie bei Lagerung (gedeckte Lager) und Ausbringung (Schleppschlauch et al.) gesenkt werden).

Die landwirtschaftlichen Biogaseinrichtungen könnten zu einem wichtigen Bestandteil eines Nährstoffmanagements in der Schweiz werden. Der Gebrauch von Gülle auf mit Phosphor übersättigten Böden könnte verunmöglicht werden. Grund hierfür könnte eine gesetzliche Grundlage sein, welche die Landwirte verpflichtet, die vorhandenen Phosphorreserven bei der Düngung zu berücksichtigen. Die Biogasanlagen könnten die Gülle behandeln und trennen. Dies würde eine Düngung von Böden mit Stickstoff aus landwirtschaftlicher Produktion ermöglichen, ohne dass mineralischer Dünger zugekauft werden muss.

Durch die CO₂-Abgabe auf fossilen Brennstoffen sowie die Forderung einer vollständigen Kompensation der CO₂-Emissionen von Gaskombikraftwerken erhält die Energiegewinnung aus Biomasse einen weiteren Vorteil (BFE 2010)

Rohstoffe, die bis anhin als Abfälle angesehen wurden wie z.B. Biomasse aus der Biopflege, werden kaum anderweitig verwendet und könnten einer sinnvollen, die Nahrungsmittelproduktion nicht konkurrenzierende, Nutzung zugeführt werden (BAFU Faktenblatt).

Biomasseanlagen können nach Fahrplan produzieren; dank ihrer Regelbarkeit können sie insbesondere auch dann Energie produzieren, wenn der Beitrag der fluktuierenden erneuerbaren Energien (wie Windkraft, PV-Anlagen) gerade sehr gering ist. Damit haben sie eine ausgleichende Wirkung, was der Regulierung des Netzes dient. Damit diese stabilisierende Wirkung erhöht werden kann, sind Kleinanlagen möglichst zu vernetzen (BFE 2010).

Steigende Preise auf den Rohstoff- und Energiemärkten haben zur Folge, dass Biogasanlagen wirtschaftlich interessanter werden. Die kostendeckende Einspeisevergütung (KEV) bietet hierbei zusätzliche Unterstützung (BFE 2010).

Risiken

Durch die Vergärung von Biomasse kann es zu Nutzungskonflikten kommen zwischen der energetischen Nutzung und anderen Nutzungsarten (Nahrungsmittelproduktion, stoffliche Nutzung, übrige Funktionen wie ökologischer Ausgleich, Landschaftsbilder und Erholungsräume) (BFE 2010).

Der Methanschlupf stellt als Emission von ungenutztem Methan einen wirtschaftlichen Verlust dar, der den gesamten Aufbereitungs- und Einspeisevorgang deutlich verteuert. Er erhöht das Unfallrisiko, und die Freisetzung des Methans hat erhebliche negative Folgen für das Klima (Baum 2007).

Mit der steigenden Anzahl und/oder der Vergrößerung von Anlagen wird der Biomassemarkt stärker umkämpft, was eine Preissteigerung bei den Rohstoffen und/oder einen Preiszerfall bei den Entsorgungsgebühren für biogene Abfälle zu Folge hat (BFE 2010). Die hohe Nachfrage nach Co-Substraten bewirkt, dass diese Ressource teils über weite Distanzen transportiert wird (graue Energie).

Ein wichtiges wirtschaftliches und strukturelles Hindernis für die Ausbreitung von Biogasanlagen sind die hohen Kosten der Wärmenetze. Obwohl in allen Anlagen Wärme anfällt, kann diese nur in Gebieten mit hoher Wärmenutzungsichte wirtschaftlich genutzt werden (BFE 2010).

Die verschiedenen energetischen Verwertungsmöglichkeiten von Biomasse (Strom, Wärme, Treibstoff) können genauso zu Nutzungskonflikten führen wie die verschiedenen Technologien, welche um die Biomasse als Brennstoff konkurrenzieren (Vergärung vs. Verbrennung) (BFE 2010).

Handlungsbedarf/ Handlungsansätze	<p>Laut dem Strategiepapier des Bundesamtes für Energie betreffend der energetischen Nutzung von Biomasse (BFE 2010) sind neben der Schaffung von Grundlagen und Anreizen auch regulatorische Instrumente nötig, um die erneuerbaren Energien auf dem Markt zu etablieren und weiter voranzutreiben. In diesem Zusammenhang gilt es, die Standardisierung von Anlagen bzw. Anlagenteilen und von Substraten/Brennstoffen weiter zu treiben (BFE 2010).</p> <p>Finanzielle Anreize für die Umsetzung helfen über die ganze Prozesskette von der Substratbereitstellung (inkl. Logistik) über die Produktion der verschiedenen Energieprodukte bis hin zur deren Verteilung. Das Ziel ist, mit Massnahmen wie Labelling bzw. der Zertifizierung von Produkten, der Entwicklung von geeigneten Förderinstrumenten (wie z.B. Lenkungsabgaben, Optimierung von Steuersystemen etc.) die Güter- und Stoffströme gemäss den strategischen Zielen des Bundes zu lenken (BFE 2010).</p>
Instrumente zur Minimierung der Umweltwirkungen	<p>Um bei der Verwertung der Gärrückstände hohe NH₃-Emissionen zu vermeiden, muss sichergestellt werden, dass diese mit emissionsmindernden Technologien ausgebracht (bspw. mit Schleppschlauch, Injektion etc.) oder anderweitig verwertet werden.</p> <p>Die Stickstoffausnutzungseffizienz von Gärgülle ist höher, Gärgülle ist aber deswegen und wegen der pH-Erhöhung anfälliger auf Ammoniakverluste während der Lagerung und Ausbringung. Wird die Gärgülle länger gelagert, sind die Ammoniakverluste bei der Ausbringung kleiner. Für den Landwirt ist die Dauer der Lagerung natürlich eine Kostenfrage.</p> <p>Um den Methanschlupf zu verringern, besteht die Möglichkeit, das Methan im Abgas durch Verbrennung zu eliminieren. Hier kommen die Techniken der Schwachgasverbrennung und der katalytischen Nachverbrennung in Frage. Da aber auch für diese Techniken Mindestmethangehalte von 4% oder mehr erforderlich sind, führt das teilweise zur paradoxen Situation, dass Erdgas bzw. Biogas zum Abluftstrom zugegeben werden muss. Aus ökonomischen Gründen ist eine solche Lösung nur dann vertretbar, wenn die entstehende Wärme genutzt werden kann (ZAHW 2008).</p>
Weitere Aspekte	<p><i>Ökobilanz</i></p> <p>Die Bereitstellung einer Kilowattstunde Strom über den gesamten Lebensweg wirkt sich je nach Kraftwerktechnologie sehr unterschiedlich auf die Umwelt aus. Laut Frischknecht et al. (2010) beträgt die Umweltbelastung von Strom an der Steckdose produziert aus Biogas ca. 210 UBPO6 (Umweltbelastungspunkte 2006). Die Luftbelastung macht dabei über 80% der Belastung aus.</p>
Literatur:	<p>BFE, BLW, ARE, BAFU, 2009: Biomassestrategie Schweiz – Strategie für die Produktion, Verarbeitung und Nutzung von Biomasse in der Schweiz, März 2009.</p> <p>BAFU 2009 (unveröffentlicht): internes Faktenblatt Biomasse (ohne Holz) der KoKo Energie, Version 14.5.2009</p> <p>BAFU 2009b: Unsere Energiezukunft – Szenarien. Umwelt 2/2009, Magazin des Bundesamtes für Umwelt, 2009.</p> <p>Baum, S. 2007: Methanverlust bei der Biogasaufbereitung. GWA, Nr. 9, 2007.</p> <p>BFE 2010: Biomasse-Energiestrategie Schweiz; Strategie für die energetische Nutzung von Biomasse in der Schweiz; Bundesamt für Energie, Bern 2010</p> <p>BFE 2011: Potenzial der Elektrizitätsproduktion der erneuerbaren Energien, Grundlagen für die Energiestrategie des Bundesrates</p> <p>BFE 2011b: Schweizerische Statistik der erneuerbaren Energie, Ausgabe 2010, Bundesamt für Energie, Bern 2011.</p> <p>Böhm, C., Quinkenstein, A., Freese, D. 2011: Agrarholzproduktion und Agroforstsysteme – Chancen und Risiken für den Gewässerschutz. Gemeinschaftsveranstaltung DWA/FNR zum Thema: Wirkung und Folgen der Nutzung von Biomasse zur Biogasgewinnung auf Böden und Gewässer, 12-13 Oktober 2011, Suderburg.</p> <p>DLR/ifeu/Wuppertal Institut für Klima, Umwelt und Energie 2004: Ökologisch optimierte Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland.</p>

Stuttgart/Heidelberg/Wuppertal.

Edelmann et al. 2001: W. Edelmann, K. Schleiss, H. Engeli, U. Baier.; Ökobilanz der Stromgewinnung aus landwirtschaftlichem Biogas, im Auftrag BFE, November 2001.

Frischknecht 2010: Ökobilanz verschiedener Kraftwerkstechnologien, PUSCH, Thema Umwelt 4/2010

Serafimova, K. 2008: Landwirtschaftliche Biogasanlagen. Lärm und Geruchvermeiden. Broschüre von Informationsstelle Biomasse.

Steubing et al. 2010: Bioenergy in Switzerland: Assessing the domestic sustainable biomass potential, EMPA 2010.

Tressner, B. 2007: Technologievergleich solarthermischer Stromerzeugung inklusive globalökonomischer und globalökologischer Bewertung. Diplomarbeit Fachhochschule Köln, Köln.

UVPV 2009: Verordnung über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPV) vom 19. Oktober 1988 (Stand am 1. Juli 2009), Artikel 21.2a.

Willms, M., v. Buttlar, C., Specka, X., Deumlich, D. 2011: Bewertung gewässerschutzrelevanter ökologischer Wirkungen von Energiepflanzen im Projekt EVA. Gemeinschaftsveranstaltung DWA/FNR zum Thema: Wirkung und Folgen der Nutzung von Biomasse zur Biogasgewinnung auf Böden und Gewässer, 12-13 Oktober 2011, Suderburg.

Wuppertal Institut für Klima Umwelt Energie/Institut für Energetik und Umwelt GmbH/UMSICHT 2005: Analyse und Bewertung der Nutzungsmöglichkeiten von Biomasse. Wuppertal/Leipzig/Oberhausen.

ZAHW 2008: Methanverluste bei der Biogasaufbereitung, Studie im Auftrag des BFE, in Zusammenarbeit mit PSI Villigen, Wädenswil 2008.

Energiestrategie 2050 – Umweltwirkungen TECHNOLOGIEN

Beurteilungsblatt Technologie Nr. 4b

Technologietyp: **Biomasse – Holzenergie**

Varianten: **Holzheizkraftwerk**

Version / Datum: Version 2, 25. April 2012

Verfasser/in: C. Bieler (INFRAS)

Wichtigste Umweltwirkungen

Holzheizkraftwerke zeichnen sich dadurch aus, dass sie keinerlei starke, nur einige schwache Umweltwirkungen haben. Die wichtigsten sind:

- Durch die Bewirtschaftung der Wälder werden seltene Habitate gepflegt und geschaffen, was sich in der Regel positiv auf die biologische Vielfalt auswirkt.
- Durch die Nutzung von anfallender Wärme (via Einspeisung in Wärmenetze) kann Wärme aus fossil befeuerten Wärmeerzeugungsanlagen (v.a. Heizungen von Gebäuden) substituiert werden. Damit leistet die Energienutzung von einem Holzheizkraftwerk einen Beitrag zur Reduktion von Treibhausgasen.
- Beim Bau einer solchen Anlage geht Fläche irreversibel verloren.

Wirkung:


in Phase:
 H: Herstellung
 R: Realisierung, Bau
 B: Betrieb
 S: Stilllegung

	Naturräume, Artenvielfalt			Klima	Schadstoffe, Lärm, NIS			Risiken	
	Biodiversität	Landschaftliche Vielfalt	Flächennutzung	Treibhausgase/ fossile Energie	Schadstoffe	Lärm	Nicht ionisierende Strahlung	Naturgefahren	Störfall
Holz-Heizkraftwerk	B	R, B	R, B	B					

Beurteilung: Biodiversität

Die Auswirkungen von Holzheizkraftwerken auf die Biodiversität werden als leicht positiv bewertet.

Die Energieholznutzung hat im Rahmen der forstlichen Nachhaltigkeit zu erfolgen, d.h. konkret, dass nicht mehr Holz im Wald genutzt wird als zuwächst. Gegenwärtig liegt die stoffliche und energetische Holznutzung im Schweizer Wald (6.2 Mio. m³) unter dem Zuwachs (9.8 Mio. m³). Nebst dem Waldenergieholz wird auch noch Restholz, Flurholz und Altholz energetisch verwertet (insgesamt ca. 4 Mio m³). Die Kantone gewährleisten eine nachhaltige Waldbewirtschaftung. Zur Kontrolle der Nachhaltigkeit auf Ebene Schweiz dient u.a. das periodisch erhobene Landesforstinventar LFI (BAFU internes Faktenblatt). Grundsätzlich ist zu erwarten, dass die Nachfrage nach Energieholz und Holzenergie in der Schweiz zunehmen wird, weil die Fördermittel für die erneuerbaren Energien mit der Teilzweckbindung der CO₂-Abgabe ab 2010 stark ausge-

baut werden (BAFU internes Faktenblatt).

Eine konkrete Waldfläche kann nicht bewirtschaftet und gleichzeitig der Natur überlassen werden. Der Wald benötigt den Waldgemeinschaften und Regionen angepasste Bewirtschaftungsmethoden, was wiederum zu unterschiedlichen Habitaten für diverse Lebewesen führen kann. Die Energieholznutzung kann zur Schaffung von lichten Wäldern beitragen (BAFU-internes Faktenblatt), was deren Biodiversität fördert. Durch zu intensive Bewirtschaftung können aber auch Verluste von Alt- und Totholz entstehen, was sich wiederum negativ auf die Biodiversität auswirkt. Die forstliche Praxis in der Schweiz berücksichtigt solche Anliegen mit angepassten Bewirtschaftungsmethoden sowie der Ausscheidung von Waldreservaten und Altholzinseln.

Landschaftliche Vielfalt

Die Auswirkungen von Holzheizkraftwerken auf die landschaftliche Vielfalt während der Bau- und Betriebsphase werden als schwach negativ eingestuft.

Diese Bewertung kommt aufgrund des Baus der Anlage und der Zufahrtsstrassen zustande, mögliche Auswirkungen auf den Wald infolge Nutzungsänderungen sind weniger relevant. Durch den Bau von Holzheizkraftwerken bleibt der Wald in seiner heutigen Ausdehnung unverändert. Gemäss BAFU wird für die Schweiz davon ausgegangen, dass aufgrund der Platzverhältnisse sowie der Konkurrenz um Agrarflächen keine Energieholzplantagen angelegt werden.

Flächennutzung

Die Flächennutzung wird als schwach negativ bewertet.

Für den Bau und Betrieb eines Holzheizkraftwerks werden geeignete Flächen benötigt, sowohl für das Kraftwerk selber als auch für Zufahrtsstrassen und den Platz für die Lagerung und Aufbereitung des Holzes. Die Beurteilung der Flächennutzung hängt stark von der gewählten Referenz ab. Gemäss der für die vorliegende Beurteilung der Technologien gewählten Methodik wird eine Anlage betrachtet, welche auf „grüner Wiese“ gebaut wird. Dies führt zu einer negativen Beurteilung der Flächennutzung. Würde eine alte Industriebrache umgenutzt, wäre das Projekt anders zu beurteilen. Um die Abwärme vor Ort nutzen zu können, ein wichtiges Kriterium, um die KEV-Anforderungen zu erfüllen, wird eine solche Anlage in der Schweiz meistens in direktem Anschluss an ein Industrie- oder Gewerbegebiet gebaut werden.

Treibhausgase und Fossile Energieträger

Die Umweltauswirkungen der emittierten Treibhausgase und der Verbrauch fossiler Energieträger werden bei den Holzheizkraftwerken in der Betriebsphase als schwach positiv bilanziert.

Da Holz ein CO₂ neutraler Energieträger ist, dominieren die Treibhausgase und der Verbrauch fossiler Brenn- und Treibstoffe während der Herstellungs-, Bau- und Stilllegungsphase in der Beurteilung. Pro kWh produzierte Wärme fallen zwischen 5 und 40 Gramm CO₂-eq. an. Bei der Stromproduktion sind es zwischen 50 und 150 g/kWh (BAFU 2009). Allerdings können durch die Nutzung der in einem Holzheizkraftwerk anfallenden Wärme fossile Energieträger substituiert werden, die für die Gebäudeheizung genutzt werden. In der Schweiz gibt es aufgrund KEV Anforderung kein Holzheizkraftwerk, welches die Wärme nicht nutzt. Nach der hier angewandten Methodik werden durch die Nutzung der Wärme aus Holzheizkraftwerken die THG-Emissionen anderer fossiler Wärmeerzeugungsanlage reduziert, ähnlich wie bei einer KVA mit Wärmenutzung.

Gesamthaft werden durch die Nutzung von Wärme und Strom aus Holzheizkraftwerken damit THG-Emissionen reduziert.

Schadstoffemissionen/Immissionen

Die Auswirkungen von Schadstoffen, emittiert durch Holzheizkraftwerke, werden über alle Lebensphasen als vernachlässigbar beurteilt.

Modernste Anlagen für die Ofenregelung und Rauchgasreinigung sorgen dafür, dass

das Holzheizkraftwerke nicht nur Anforderungen der Luftreinhalteverordnung (LRV), erfüllen, sondern auch die Grenzwerte für „naturemade star“. Es werden rund 30-mal weniger Feinstaub sowie rund 4-mal weniger Kohlenmonoxid ausgestossen, als vergleichbare individuelle Holzschnitzelheizungen und kleine Holzschnitzel-Nahwärmeverbände. Die LRV schreibt für Feuerungen ab 500 kW strengere Vorschriften als für kleinere Feuerungen und eine faktische Filterpflicht vor. In der Regel haben diese Anlagen keine Probleme, die Grenzwerte für „naturemade star“ einzuhalten. Somit gilt es zu bilanzieren, dass die heutigen Vorschriften zur Luftreinhaltung den Stand der Technik verlangen und für solche Anlagen geringe Emissionen, vergleichbar mit dem Niveau einer KVA, bewirken. Durch die Annahme das Wärme heute durch fossile Energie erzeugt wird, ergibt sich für Holzheizkraftwerke ein Potenzial zur Reduktion von fossilen Brennstoffen und folglich auch deren Luftschadstoffe. Vorausgesetzt wird hierfür, dass während der Betriebsphase keine weiteren Schadstoffe emittiert werden, was trotz den geringen Emissionen nicht gegeben ist. Deswegen wurden in der Bilanz die Auswirkungen von Schadstoffen als neutral beurteilt.

Die Entnahme und Verbrennung von Holz entzieht dem Wald in gewissem Masse Nährstoffe und Schadstoffe, welche bei der Deponierung der Ascherückstände wieder anfallen. Durch die Kaskadennutzung von Holz als Energieträger wird in der Schweiz teilweise behandeltes Altholz als Brennstoff eingesetzt. Ascherückstände müssen nach geltendem Recht auf einer geeigneten Deponie entsorgt, dürfen also nicht als Dünger verwendet werden (BAFU-internes Faktenblatt).

NIS und Lärm

Die Auswirkungen auf die Umwelt bezüglich NIS und Lärm werden als vernachlässigbar bewertet, weil Holzheizkraftwerke Industrieanlagen sind, welche nur in den entsprechenden Bauzonen, in denen höhere Lärmwerte zulässig sind, realisiert werden können. Es ist davon auszugehen, dass der Lärm der Betriebsstoffanlieferung und der Betrieb an sich durch betriebliche und bauliche Massnahmen auf ein verträgliches Mass reduziert werden kann.

Naturgefahren und Störfälle

Die Umweltauswirkungen betreffend Naturgefahren und Störfälle werden ebenfalls als vernachlässigbar beurteilt. Dies, weil einerseits kein Naturgefahrenpotenzial der Holzheizkraftwerke unter Einhaltung der Schweizer Gesetze gegeben ist (Schutzwald darf nicht gerodet werden), andererseits keine aussergewöhnlichen Störfälle bekannt sind, die sich nicht auch bei jeder anderen Industrieanlage ereignen könnten und bei Einhaltung der allgemeinen Sicherheitsbestimmungen eingeschränkt werden.

Ausgangslage, Bedeutung der Technologie	Die aktuelle Förderung durch die kostendeckende Einspeisevergütung (KEV) führte zu einem Boom von Planungen stromproduzierender Holzenergieanlagen (BAFU internes Faktenblatt). Der Bestand an Holzheizkraftwerk-Anlagen betrug 2010 Schweiz weit neun Anlagen mit einer installierten Feuerungsleistung von 191MW. Die Stromproduktion im gleichen Jahr belief sich auf weniger als 0.1 TWh-el.
Aussichten, Zukünftige Entwicklungspotenziale	Das nachhaltig verwertbare Potenzial bis 2050 von einheimischem Holz als Energieträger beträgt etwa 1.1 TWh-el, wovon weniger als 0.1 TWh-el bereits genutzt werden. 1 TWh-el bleibt als noch nutzbares Potenzial übrig (BFE 2011b). Bei der Stromproduktion aus Holz entsteht immer auch Abwärme, die es konsequent zu nutzen gilt. Daher ist eine optimale Standortwahl mit einer ganzjährigen Wärmeabnahme Voraussetzung für einen gesamtenergetisch effizienten Betrieb. Mit dem heutigen Stand der Technik ist auch die reine Wärmenutzung aus Holz energetisch ebenso effizient.
Chancen	Holzenergie ist nach der Wasserkraft der heute zweitwichtigste einheimische und erneuerbare Energieträger der Schweiz. Die inländische Wertschöpfung ist deutlich höher als bei den nicht erneuerbaren Energieträgern. Das investierte Kapital bleibt in der Region und somit im Inland wirksam. Langfristig wird der Anteil Energieholz im Wald zunehmen: Die erfolgte Extensivierung der Bestandespflege (biologische Rationalisierung) impliziert eine Zunahme der min-

derwertigen Sortimente – gleichzeitig bringen der naturnahe Waldbau sowie die Anpassung des Waldes an die Klimaveränderung vermehrt weniger nachgefragte Laubhölzer hervor, für welche die energetische Verwertung mitunter die einzige ressourcenökonomische Alternative darstellen kann (BAFU Faktenblatt).

Risiken

Die verschiedenen energetischen Verwertungsmöglichkeiten von Biomasse (Strom, Wärme, Treibstoff) können genauso zu Nutzungskonflikten führen wie die verschiedenen Technologien, welche um die Biomasse als Brennstoff konkurrieren (Vergärung vs. Verbrennung) (BFE 2010).

Handlungsbedarf/ Handlungsansätze

Ab 2012 ist eine weitere Verschärfung der LRV Grenzwerte beschlossen. Wichtig ist, dass ein konsequenter Vollzug der LRV und der daraus abgeleiteten Empfehlungen auf allen Ebenen erwirkt wird.

Eine Stärkung der Holzverarbeitungskette fördert einen gesunden Markt und ist langfristig Garant für eine funktionierende Waldbewirtschaftung. Die Stärkung der Wertschöpfungskette Holz kommt insbesondere dem ländlichen Raum zu Gute. Die Holzenergie trägt zudem zu einer dezentralen Energieversorgung bei und macht damit unabhängiger vom internationalen Energiemarkt.

Weitere Aspekte

Ökobilanz

Die Bereitstellung von einer Kilowattstunde Strom über den gesamten Lebensweg wirkt sich je nach Kraftwerktechnologie sehr unterschiedlich auf die Umwelt aus. Laut Frischknecht (2010) beträgt die Umweltbelastung von Strom aus der Steckdose, produziert in einem Holzheizkraftwerk, ca. 280 UBP06 (Umweltbelastungspunkte 2006). Die Luftbelastung macht dabei über 80% der Gesamtbelastung aus.

Literatur:

- BFE, BLW, ARE, BAFU, 2009:** Biomassestrategie Schweiz – Strategie für die Produktion, Verarbeitung und Nutzung von Biomasse in der Schweiz, März 2009.
- BAFU 2009 (unveröffentlicht):** Faktenblatt Holzenergie der KoKo Energie, Version 20.9.2009
- BAFU 2009:** Unsere Energiezukunft – Szenarien. Umwelt 2/2009, Magazin des Bundesamtes für Umwelt, 2009.
- BAFU 2011:** Jahrbuch Wald und Holz 2011. Bundesamt für Umwelt, Bern.
- BFE 2010:** Biomasse-Energiestrategie Schweiz; Strategie für die energetische Nutzung von Biomasse in der Schweiz; Bundesamt für Energie, Bern 2010
- BFE 2011:** Schweizerische Statistik der erneuerbaren Energie, Ausgabe 2010, Bundesamt für Energie, Bern 2011.
- BFE 2011b:** Potenzial der Elektrizitätsproduktion der erneuerbaren Energien, Grundlagen für die Energiestrategie des Bundesrates, Bern, Mai 2011
- DLR/IFEU/WI 2004:** Ökologisch optimierte Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland. DLR/IFEU/Wuppertal Institut für Klima, Umwelt und Energie, Stuttgart/Heidelberg/Wuppertal 2004.
- ETHZ 2011:** Energiezukunft Schweiz, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, November 2011.
- Frischknecht 2010:** Ökobilanz verschiedener Kraftwerkstechnologien, PUSCH, Thema Umwelt 4/2010
- Jungbluth, N., Frischknecht, R., Faist, M. 2001:** Ökobilanz für die Stromerzeugung aus Holzbrennstoffen und Altholz. Jahresbericht 2001. Energieforschungsprogramm Biomasse. Uster
- LRV 2010:** Luftreinhalte-Verordnung vom 16. Dezember 1985 (LRV), Stand 15. Juli 2010
- Steubing et. al. 2010:** Bioenergy in Switzerland: Assessing the domestic sustainable biomass potential, Renewable and Sustainable Energy Reviews 14, 2010, pp. 2256-2265
- WaG 1991:** Bundesgesetz vom 4. Oktober 1991 über den Wald (Waldgesetz, WaG)

Energiestrategie 2050 – Umweltwirkungen TECHNOLOGIE

Beurteilungsblatt Technologie Nr. 5

Technologietyp: **Geothermie**

Varianten: **Geothermale Systeme zur Nutzung tiefer Aquifere
Stimulierte geothermische Systeme (EGS)**

Untiefe Geothermie (Erdsonden) waren nicht Bestandteil der Untersuchungen.

Version / Datum: Version 2, 24. April 2012

Verfasser/in: C. Bieler (INFRAS)

Wichtigste Umweltwirkungen

Geothermische Anlagen zeichnen sich dadurch aus, dass sie keinerlei starke, nur eine Reihe schwacher Umweltwirkungen haben. Die drei wichtigsten sind:

- Durch die Nutzung von anfallender Wärme (via Einspeisung in Wärmenetze) kann Wärme aus fossil befeuerten Wärmeerzeugungsanlagen (v.a. Heizungen von Gebäuden) substituiert werden. Damit leistet die Energienutzung geothermaler Energiesysteme einen Beitrag zur Reduktion von Treibhausgasen, der in der Bilanz überwiegt.
- Für stimulierte geothermische Systeme besteht ein standortabhängiges Risiko von Erschütterungen und Beben bei Stimulation des Untergrundes. Das Risiko für Naturgefahren liegt jedoch unterhalb der Schwelle für schwere gesellschaftliche Schäden.
- Gemäss BAFU besteht bei Bohrungen dieser Tiefe grundsätzlich ein Risiko, die Nutzung von Grundwasser als Trinkwasser zu gefährden.

Wirkung:

 positiv
 negativ
 stark
 schwach

in Phase:
 H: Herstellung
 R: Realisierung, Bau
 B: Betrieb
 S: Stilllegung

	Naturräume, Artenvielfalt			Klima Treibhausgase/ fossile Energie	Schadstoffe, Lärm, NIS			Risiken	
	Biodiversität	Landschaftliche Vielfalt	Flächennutzung		Schadstoffe	Lärm	Nicht ionisierende Strahlung	Naturgefahren	Störfall
geotherm. Syst. zur Nutzung tiefer Aquifere		R, B		B	B	R			
stimulierte geothermische Systeme (EGS)		R, B		B	B	R		R	

Beurteilung: Indikatoren für Naturräume Artenvielfalt

Die Auswirkungen auf Naturräume und Artenvielfalt beschränkt sich auf die landschaftliche Vielfalt. Die Auswirkungen von geothermischen Kraftwerken auf die Biodiversität

und die Flächennutzung sind vernachlässigbar.

Da sich die Energieressource von geothermalen Systemen tiefer als 400 Meter untertags befinden und deren Nutzung in geschlossenen Kreisläufen stattfindet, sind negative Auswirkungen auf Umweltsysteme mit hoher Biodiversität (z.B. Wald, Gewässer) oder oberflächennahes Grundwasser in allen Lebenszyklusphasen nur im Störfall gegeben (z.B. Leck während den Bohrarbeiten, fehlerhafte Abdichtungen etc.). Gemäss BAFU besteht bei Bohrungen dieser Grössenordnung ein grundsätzliches Risiko für die Nutzung von Grundwasser als Trinkwasser.

Der Landverbrauch bzw. die Flächeninanspruchnahme der übertägigen Anlagenteile ist vergleichbar mit konventionellen Kraftwerksanlagen gleicher Leistung, je nach Literatur sogar so gering wie bei keiner anderen Energieform (LFU 2010). Der Landverbrauch einer 110 MW-Geothermie-Anlage beträgt 0.0002 m²/kWh. Als Vergleich: eine gebäudebezogene Photovoltaikanlage benötigt ca. 0.01 m² Dachfläche pro kWh, also etwa 50 Mal mehr (Tester et al. 2006).

Der Landverbrauch während der Bauphase (Zufahrtsstrasse, deponieren von Bohrklein etc.) ist von kurzer Dauer und mehrheitlich reversibel.

Nebst der vernachlässigbaren Flächennutzung bzw. dem Landverbrauch hat der Bau der Oberflächenanlagen von Geothermie-Kraftwerken auch eine als schwach negativ beurteilte Wirkung der landschaftlichen Vielfalt zur Folge.

Treibhausgase und fossile Energieträger

Die Emission von Treibhausgasen der Energieproduktion durch geothermale Systeme beschränkt sich auf die Phase der Herstellung benötigter Werkstoffe und die Bauphase der Kraftwerke (speziell der Bohrungen). Aufgrund der Substitution fossiler Energieträger durch die Wärmenutzung werden die Umweltauswirkungen der emittierten Treibhausgase und der Verbrauch fossiler Energieträger bei den Holzheizkraftwerken in der Betriebsphase als schwach positiv bilanziert.

Treibhausgase werden vor allem bei der Erstellung der Bohrungen emittiert, da hierfür viel fossile Energie aufgewendet werden muss. Auch die Herstellung von Zement und Stahlrohren sowie die Herstellung der Baustoffe für die übertags zu bauenden Anlagen emittieren gewisse Mengen an Treibhausgasen, welche allerdings vergleichbar sind mit denen der Herstellung der Baustoffe für andere Kraftwerke gleicher Leistung. Betrieb und Rückbau einer Anlage sind demgegenüber nur mit verhältnismässig geringen Emissionen verbunden (BMU 2007).

Eine abschliessende Quantifizierung der Emissionswerte ist schwierig, da diese stark vom geologischen Untergrund (z.B. Tiefe, Temperatur und Produktivität des Aquifers/ Hot Dry Rock) und der Kraftwerkart abhängen. Schätzungsweise belaufen sich bei Kraftwerken, welche nur Elektrizität produzieren, die spezifischen Mengen an Treibhausgasen (ca. 20–60 g CO_{2eq}/kWh) auf einen Bruchteil der spezifischen Treibhausgasemissionen, welche die Stromproduktion auf Basis Photovoltaik (ca. 40–150 g CO_{2eq}/kWh) verursacht. Anlagen, welche neben der Stromerzeugung auch eine Wärmekopplung für ein Fernwärmenetz haben (was faktisch immer der Fall ist in der Schweiz), emittieren zusätzlich 1–10 gCO_{2eq}/kWh (Frick et al. 2010, BAFU 2009).

Allerdings können durch die Nutzung der in geothermalen Kraftwerken anfallenden Wärme fossile Energieträger substituiert werden, die für die Gebäudeheizung genutzt werden. In der Schweiz sind geothermale Systeme vor allem für Wärmeproduktion interessant. Nach der hier angewandten Methodik werden durch die Nutzung der Wärme aus Geothermie-Kraftwerken die THG-Emissionen anderer fossiler Wärmeerzeugungsanlagen reduziert.

Gesamthaft werden durch die Nutzung von Wärme und Strom aus geothermalen Energiesystemen damit THG-Emissionen reduziert.

Schadstoffe

Der Schadstoffausstoss geothermalen Systeme wurde in allen Lebensphasen als schwach positiv beurteilt. Dies hat folgenden Grund.

Durch die Annahme das Wärme heute durch fossile Energie erzeugt wird, ergibt sich für geothermale Anlagen ein Potenzial zur Reduktion von fossilen Brennstoffen und

folglich auch deren Luftschadstoffe. Vorausgesetzt wird hierfür, dass während der Betriebsphase keine weiteren Schadstoffe emittiert werden. Dies ist im Fall der Geothermie gegeben, denn in Klutwasserströmen können zwar gelöste Salze und Mineralstoffe (z.B. Bor und Arsen) durch das Bohrloch an die Oberfläche transportiert werden, jedoch ist das Austreten dieser Schadstoffe aus dem geschlossenen System nur durch einen Unfall oder Störfall der Anlage möglich. Im normalen Betrieb werden diese Schadstoffe wieder in den Untergrund geleitet und es treten keine gelösten Schadstoffe aus (Tester et al. 2006). Werden die in den eingebauten Filtern ausgefällten Schadstoffe ordnungsgemäss entsorgt, bewegen sich diese im gesetzlichen Rahmen (BMU 2007).

Lärm

Da bis auf die Bauphase keine aussergewöhnliche Lärmbelastung existiert, wurde die Umweltwirkung als schwach negativ bewertet.

Das Niederbringen der Bohrung führt zu Lärmemissionen, die aber durch technische Massnahmen auf das gesetzlich erlaubte Mass reduziert werden können (BMU 2007). Während der Bohrungen und Testphasen kann innerhalb des Geländes Lärm im Bereich zwischen 80 und 115 Dezibel (dBA) entstehen, welche in einer Entfernung von 900 Metern auf 71 bis 83 Dezibel (dBA) sinken. Zum Vergleich: urbane Regionen haben einen Grundlärmpegel von 70–85 Dezibel (dBA) (Tester et al., 2006). Im Betrieb können die Geräuschemissionen vernachlässigt werden, da lediglich Lüftungen betrieben werden und keine Fahrten zur Anlieferung von Energieträgern notwendig sind (Geothermie Dialog, 2011).

Naturgefahren

Die Auswirkungen bezüglich Naturgefahren (in dem Fall vor allem Erschütterungen und Beben) wurden bei den stimulierten geothermalen Systemen (EGS) als leicht negativ in der Realisierungs- /Bauphase bewertet, bei den geothermalen Systemen zur Nutzung tiefer Aquifere hingegen neutral.

Prinzipiell sind Bohrungen durchaus mit Risiken verbunden, z.B. durch anbohren von artesisch gespanntem Grundwasser, gas- oder ölhaltigen Gesteinsschichten sowie solchen mit reaktionsfähigen Mineralien wie z.B. Anhydrit, Veränderung der chemischen und hydraulischen Verhältnisse oder aufgrund von neuen Wegsamkeiten zwischen verschiedenen Grundwasserstockwerken. Ab einer gewissen Tiefe können auch konventionelle hydrothermale Geothermie-Kraftwerke ohne Stimulation Druckänderungen im Reservoir in seismisch labilen Zonen hervorrufen. Diese Mikroseismizität kann zu kleineren Erdbeben führen (BMU 2007). Da diese möglichen negativen Auswirkungen nicht grundsätzlicher Natur sind, sondern direkt mit der Standortwahl zusammenhängen, ist die Bewertung der geothermalen Systeme zur Nutzung tiefer Aquifere neutral. Durch die Untersuchungen vor und während der Realisierung einer Anlage können diese labilen Zonen erkannt und ggf. entsprechende Gegenmassnahmen getroffen werden, oder die Anlage verlegt, resp. stillgelegt werden (Kanton Basel-Stadt 2010).

Bei der Errichtung von stimulierten geothermischen Systemen ist während der Stimulation der Reservoirs das Risiko von leichten Beben höher als ohne Stimulation. Die Erfahrung in Basel hat gezeigt, dass der Bau einer tiefen geothermischen Anlage mit herkömmlichen Methoden bedeutende Spannungsänderungen im tektonisch hoch gespannten Untergrund hervorrufen kann, welche die seismische Aktivität über längere Zeitperioden beeinflussen können. Ein Hauptbeben der Stärke 3.4 und mehrere spürbare Erdbeben in den darauffolgenden ca. vier Monaten waren in Basel die Konsequenz der Bohrung. Allerdings ist das Risiko von Erdbeben auch hier vom Standort abhängig, durch die Stimulation ist das Risiko allerdings weniger genau einschätzbar. Der Kanton Basel-Stadt kam zum Schluss, dass eine Weiterführung des Projekts in Basel ein Personenschadenrisiko gehabt hätte, welches unterhalb der Schwelle für schwere gesellschaftliche Schäden geblieben wäre. Aus der Sicht der zu erwartenden Sachschäden wurde das Risiko gemäss des Massstabs der Schweizerischen Störfallverordnung sowohl hinsichtlich der Häufigkeit des Auftretens als auch der Schadenssumme als nicht akzeptabel beurteilt.

Unsere Beurteilung des Sachschadenrisikos als schwach negative Umweltwirkung ergibt sich auch aus einem Vergleich mit anderen technischen Risiken in der Schweiz, deren zusammengefasstes Sachschadenrisiko zum Teil geringer ist als dasjenige des DHM-Projekts in Basel (Kanton Basel-Stadt 2010, BMU 2007).

Störfall

Das Risiko eines Störfalls wird als vernachlässigbar beurteilt.

Während verschiedenen Lebenszyklusphasen der Kraftwerke können sich Störfälle wie die Freisetzung von Thermalwasser, der Bruch von Dampfrohren, das Versagen von Turbinen, Feuer etc. ereignen, die sich nicht von Störfällen in anderen industriellen Kraftwerken unterscheiden. Einzigartig für den Bau von geothermalen Anlagen sind die Bohrtätigkeiten und die mit der Erschliessung der Bohrung verbundenen Tests. Durch eine mangelhafte Abdichtung/Hinterfüllung der Bohrung bzw. neuen Wegsamkeiten zwischen Grundwasserstockwerken mit unterschiedlichen hydraulischen und chemischen Eigenschaften kann die Nutzung des Grundwassers als Trinkwasser beeinträchtigt werden. In den frühen Tagen der Geothermie waren Thermalwasserausbrüche während der Bohrungen nicht selten, aber heute werden schnell reagierende Bohrlochschieber eingesetzt, welche solche Ausbrüche automatisch verhindern (Tester et al., 2006).

Falls es zu einem Austreten von Thermalwasser in die Biosphäre kommen würde, könnten die gelösten Salze und Mineralstoffe je nach Konzentration Umwelteffekte in lokalen Biotopen zur Folge haben. Dieses Risiko kann jedoch durch eine sorgfältige Planung und geeignete Massnahmen, (z.B. Lecküberwachungssysteme und Auffangbehältnisse) praktisch ausgeschlossen werden (BMU 2007).

Ausgangslage, Bedeutung der Technologie

In der Schweiz wurden in jüngerer Zeit vier Projekte tiefer geothermalen Systeme lanciert. In Basel wurde im Dezember 2006 das Projekt zur stimulierten geothermischen Energiegewinnung (EGS) als Folge von induzierten Beben gestoppt. Im Anschluss wurde eine Risikoanalyse durchgeführt mit fachlicher und finanzieller Unterstützung von BAFU und BFE. Schliesslich wurde das Projekt aus politischen Erwägungen (Anzahl und Stärke der bei der Stimulation zu erwartenden Beben/Erschütterungen) gestoppt (BAFU 2010).

In Zürich wurde 2011 eine Bohrung beim Triemli, welche nicht auf wasserführende Schichten stiess, in einer Tiefe von 2371 Metern beendet. Diese erbringt heute mit einer sogenannten tiefen Erdwärmsonde eine Wärmeproduktion von 0.0004 TWh/a (EWZ 2011).

Ein weiteres Projekt wurde in St. Gallen gestartet, wo momentan noch die Vorbereitungen für die eigentlichen Bohrungen am Laufen sind. Geplant ist ein Kraftwerk, das jährlich rund 0.09 TWh Strom und Wärme liefert. Letztere sollen in ein neu zu erstellendes Fernwärmenetz im Osten der Stadt eingespeist werden (SATW 2006; Stadt St. Gallen 2012).

In Lavey (VD) wird ein Projekt realisiert, welches jährlich rund 0.024 TWh Wärme liefern soll. Die Wärme wird in der Therme von Lavey-les-Bains (VD), in einem industriellen Werk und über ein Fernwärmenetz in Lavey (VD) und St. Maurice (VS) genutzt. Derzeit wird in der Schweiz kein Strom aus geothermalen Systemen produziert, u.a. weil sich mit dem Temperaturniveau der geförderten Wärme keine Dampfturbine betreiben lässt.

Aussichten, Zukunftige Entwicklungspotenziale

Zur Stromerzeugung eignet sich nur die tiefe Geothermie, weil Mindesttemperaturen von mehr als 100 °C voraus gesetzt werden. Damit netto (d.h. nach dem elektrischen Antrieb der Förderpumpen) eine Stromproduktion erreicht werden kann, braucht es höhere Temperaturen (ca. 200 °C). Begrenzt ist das Potenzial der tiefen Geothermie nicht durch die Ressource, sondern durch die Technologie zur Erschliessung. Standorte für Geothermale Systeme zur Nutzung tiefer Aquifere, die alle Anforderungen erfüllen, sind sehr selten. Meistens muss das Reservoir stimuliert werden, um optimale Voraussetzungen zu schaffen. Die Technologie dieser stimulierten geothermalen Systeme ist allerdings noch nicht vollends ausgereift und kann aufgrund des Risikos von Beben und Erschütterungen zu Akzeptanzproblemen der lokalen Bevölkerung führen

(ETHZ 2011).

Der elektrische Wirkungsgrad ist abhängig von der Temperatur der Dampferzeugung. Daher sind für die Stromerzeugung primär das Hot-Dry-Rock-Verfahren und ähnliche EGS-Verfahren interessant. Aquifere dagegen lassen – wenn überhaupt – nur eine geringe Stromerzeugung zu und sind daher für eine Wärmenutzung prädestiniert. Das Potenzial der tiefen Geothermie wird bis ins Jahr 2050 auf 2.1 TWh/a Strom und 2.3 TWh/a Wärme geschätzt (SATW 2006). Das BFE (Prognos-Studie) kommt rund 4.4 TWh/a zum gleichen Potenzial bis 2050. Im Jahr 2007 wurden 0.3 TWh Wärme aus tiefer Geothermie gewonnen. Strom wurde keiner produziert (BFE 2007, BFE 2011).

Chancen	<p>Geothermische Kraftwerke liefern Bandenergie wie die Laufwasser- und Kernkraftwerke, was gegenüber der fluktuierenden Energieproduktion aus Photovoltaik- und Windkraftwerken vorteilhaft ist (ETHZ 2011).</p> <p>Wärme und Energie kann mittels geothermaler Systeme am Ort des Bedarfs nutzbar gemacht werden, was Kosten für den Transport erspart. Zudem ist der Platzbedarf relativ gering (BFE 2006).</p> <p>Die Reservoirs der tiefen Geothermie bieten die Möglichkeit für die Sequestrierung von CO₂, wobei beachtet werden muss, dass diese Technologie noch nicht ausgereift ist (frühestens 2020), und in der Schweiz auch noch keine gesetzliche Grundlage dafür besteht (Tester et al. 2006).</p>
Risiken	<p>Geothermieprojekte benötigen hohe Investitionen (vor allem Bohrkosten), verbunden mit dem Risiko, nicht die erwünschten optimalen Bedingungen vorzufinden. Erforschung und Ausbeutung der Ressourcen (Bohrungen) machen rund 50% der Gesteungskosten aus. Zunehmende Erfahrung und neue Bohrtechniken werden dieses Problem vermutlich reduzieren (ETHZ 2011).</p> <p>Für die Wirtschaftlichkeit von Geothermie-Kraftwerken in der Schweiz ist die Nutzung der Abwärme ein wesentlicher Bestandteil (ETHZ 2011). Wenn die Infrastruktur nicht schon vorhanden ist, kann die Koppelung von thermaler Strom- und Wärmeproduktion allerdings auch schnell zu einem wirtschaftlichen Nachteil werden, da der Aufbau eines Fernwärmenetzes sehr kostenintensiv ist.</p>
Handlungsbedarf/ Handlungsansätze	<p>Bei EGS Projekten sind Erschütterungen zu erwarten. Deren Umfang und Konsequenzen müssen bei neuen Projekten abgeschätzt und beurteilt werden. Zur Förderung von tiefen Geothermieprojekten sind die Rahmenbedingungen im Bereich „Grenzwerte und Risikomanagement für Erschütterungen“ zu schaffen (BAFU 2010).</p> <p>Die Fündigkeitschancen für ideale geologische Voraussetzungen sind in der Schweiz relativ klein, da der Schweizer Untergrund noch zu wenig erforscht ist. Investitionen in dessen Erforschung könnten zu den zur Auslösung von Bauinvestitionen notwendigen Impulsen führen.</p>
Instrumente zur Minimierung der Umweltwirkungen	<p>Zur Realisierung thermaler Energiesysteme in der Schweiz bestehen bereits zahlreiche Vorschriften und Richtlinien (z.B. Gewässerschutzverordnung Art. 32) Was noch fehlt, sind Vorschriften zum Rückbau der Untertagsinfrastruktur.</p>
Literatur	<p>BAFU 2009: Unsere Energiezukunft – Szenarien. Umwelt 2/2009, Magazin des Bundesamtes für Umwelt, 2009.</p> <p>BAFU 2010 (unveröffentlicht): Internes Faktenblatt Geothermie und Umweltwärme der KoKo Energie, Version 21.07.2010.</p> <p>BFE 2011: Potenzial der Elektrizitätsproduktion der erneuerbaren Energien, Grundlagen für die Energiestrategie des Bundesrates</p> <p>BFE 2010: Schweizerische Statistik erneuerbare Energien 2010, Bundesamt für Energie, Bern</p> <p>BFE 2007: Schweizerische Statistik erneuerbare Energien 2007, Bundesamt für Energie, Bern</p> <p>BFE 2006: Nutzung der Erdwärme, Überblick, Technologie, Visionen, Bundesamt für Energie, Bern.</p> <p>BMU 2007: Tiefe Geothermie in Deutschland, Bundesministerium für Umwelt, Natur-</p>

schutz und Reaktorsicherheit, September 2007, Berlin.

ETHZ 2011: Energiezukunft Schweiz, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, November 2011.

EWZ 2011: Geothermie Newsletter 1/2011, Elektrizitätswerke der Stadt Zürich, Februar 2011

Frick, S., Kaltschmitt, M., Schröder, G. 2010: Life cycle assessment of geothermal binary power plants using enhanced low temperature reservoirs. Energy. Vol. 35, Nr. 5, 2281-2394.

Geothermie Dialog 2011: Welche Geräusche machen Geothermiekraftwerke?

[http://www.geothermie-dialog.de/index.php?option=com_content&view=article&id=17%3Awelche-geraeusche-machen-geothermie-kraftwerke-&catid=2%3Afragen-zur-geothermie&Itemid=3 Zugriff 8.12.2011]

Kanton Basel-Stadt 2010: Abschlussbericht über die Risikoanalyse zum Deep Heat Mining Projekt Basel, Basel.

LFU 2010: Bayerisches Landesamt für Umwelt, Erdwärme – die Energiequelle aus der Tiefe, Reihe UmweltWissen, Augsburg 2010.

SATW 2006: Road Map Erneuerbare Energien Schweiz, Eine Analyse zur Erschließung der Potenziale bis 2050, Schweizerische Akademie der technischen Wissenschaften, Zürich.

Stadt St. Gallen 2012: Das Geothermie Projekt der Stadt St. Gallen, Online abrufbar unter: <http://www.geothermie.stadt.sg.ch/aktuell/>, eingesehen am 24.02.2012

Tester, J.W. et al., 2006: The future of geothermal energy, Impact of enhanced geothermal systems (EGS) on the United States in the 21st century, Massachusetts Institute of Technology, 2006.

Energiestrategie 2050 – Umweltwirkungen Technologien

Beurteilungsblatt Technologie Nr. 6

Technologietyp: **Strom und Wärme aus Kehrichtverbrennungsanlagen (KVA)**

Version/Datum: Version 2, 25. April 2012

Verfasser/in: B. Oettli (INFRAS)

Wichtigste Umweltwirkungen

In diesem Faktenblatt werden nur die Umweltwirkungen der Produktion und Nutzung von Strom und Wärme in/aus KVA beurteilt. Falls die KVA ihrem Auftrag gemäss primär als Abfallbehandlungsanlagen betrachtet werden und deren Umweltwirkungen primär der Abfallbehandlungen angelastet wird, beschränken sich die Umweltwirkungen als Folge der Erzeugung und Nutzung von Strom und Wärme auf den Anteil, der durch die Realisierung, den Bau und Betrieb der Anlageteile, die für die Einspeisung der Wärme in ein Wärmenetz sowie für die Produktion von Elektrizität und deren Einspeisung in das Stromnetz verursacht wird.

Durch die zusätzliche Nutzung von in KVA anfallender Wärme (via Einspeisung in Wärmenetze) kann Wärme aus fossil befeuerten Wärmeerzeugungsanlagen (v.a. Heizungen von Gebäuden) substituiert werden. Damit leistet die zusätzliche Energienutzung aus KVA einen wesentlichen Beitrag zur Reduktion von Treibhausgasen.

Wirkung:

- positiv
- negativ
- stark
- schwach

in Phase:

- H: Herstellung
- R: Realisierung, Bau
- B: Betrieb
- S: Stilllegung, Rückbau

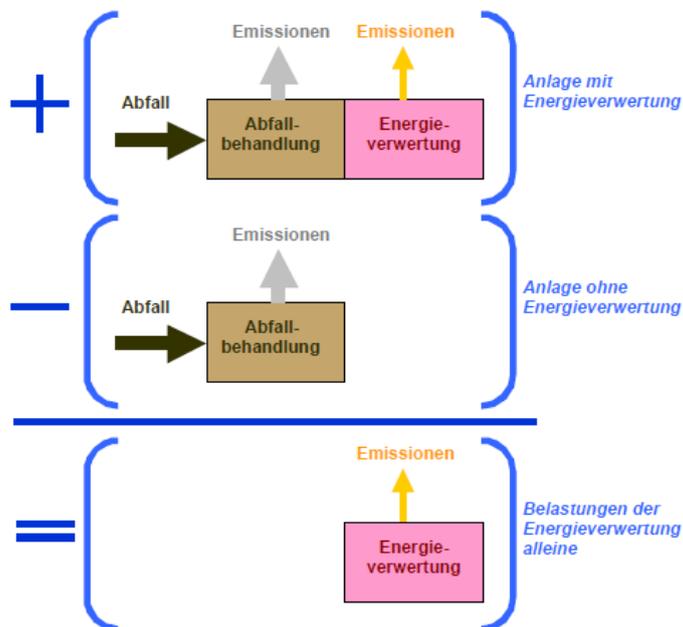
	Naturräume, Artenvielfalt			Klima	Schadstoffe, Lärm, NIS			Risiken	
	Biodiversität	Landschaftliche Vielfalt	Flächennutzung	Treibhausgase/fossile Energie	Schadstoffe	Lärm	Nicht ionisierende Strahlung	Naturgefahren	Störfall
KVA									

Beurteilung

Vorbemerkung zur Methodik der Beurteilung der Umweltwirkungen

Die KVA haben einen Entsorgungsauftrag. Sie haben in der Schweiz primär die Funktion einer Abfallentsorgungsanlage, die Nutzung der bei der Verbrennung frei werdenden Energie in Form von Wärme und Strom kommt erst sekundär. Infolge des Entsorgungsauftrags können die KVA ihre CO₂-Emissionen nicht durch die Reduktion der verbrannten Abfallmenge steuern (ausser bei Abfallimporten), zudem emittieren sie Treibhausgase, ob Wärme und Strom genutzt wird oder nicht. Im vorliegenden Faktenblatt für die Nutzung von Strom und Wärme aus den KVA werden daher nur die aufgrund der Energie-(Strom- und Wärme-)Nutzung entstehenden zusätzlichen Umweltwirkungen im Vergleich zu den Umweltwirkungen einer hypothetischen KVA ohne Wärmenutzung und Stromproduktion/-Nutzung (Referenz) beurteilt. Diese Methodik wurde auch in der Studie zur Ermittlung einer Ökobilanz (BUWAL/AWEL 2005) be-

nutzt, die der Nutzung der Energie aus KVA eine ausgezeichnete Ökobilanz zumisst. Figur 5 zeigt die prinzipielle Methodik, welche sowohl der oben erwähnten Ökobilanzierung wie auch der Beurteilung in diesem Faktenblatt zugrunde liegt.



Figur 5 Schematische Darstellung des Prinzips der Beurteilung einer KVA mit Nutzung der produzierten Energie (Strom und Wärme) vs. einer KVA als reine Abfallbehandlungsanlage (ohne Einspeisung von Strom oder Wärme in ein elektrisches oder ein Wärmenetz) (Quelle: BUWAL/AWEL 2005).

Um dem Leser trotz der angewandten Relativbetrachtung (vs. Referenz) einen Eindruck der wichtigsten Umweltwirkungen einer typischen KVA zu verschaffen, soll dieses Faktenblatt dennoch eine Übersicht geben, welches – absolut gesehen – die wichtigsten Umweltbelastungen einer KVA sind. Diese absoluten Umweltwirkungen sind in der Folge in normaler Schrift dargestellt. Die *resultierende Mehrbelastung der Stromproduktion in einer KVA* gegenüber der Referenz (KVA ohne Nutzung von Wärme oder Strom) wird *in kursiver Schrift* dargestellt.¹⁷

Treibhausgase und fossile Energieträger

¹⁷ Der Vergleich mit der Referenzanlage stimmt nur in der Grössenordnung. Im Detail ist der Vergleich etwas komplizierter, da in der Praxis bei einer KVA nicht einfach „ein Generator zur Stromproduktion angeschlossen werden kann“, ohne dass sich die betrieblichen Verhältnisse und insbesondere die Wirkungsgrade der Strom- und Wärmeproduktion substantiell verändern.

Technischer Exkurs zur Erläuterung: Im Kehrichtofen wird der Abfall verbrannt und mit der anfallenden Wärme Dampf auf einem hohen Druck- und Temperaturniveau erzeugt. Der Dampf wird einer Gegendruck- oder Kondensationsturbine zugeführt. Je nach Anforderungen der Fernwärme (Heizen, Prozessdampf) wird der Turbine Energie in Form von Dampf entzogen. Je nach Menge und Höhe des Druck- bzw. Temperaturniveaus der Dampfkoppelung sinkt der Wirkungsgrad der Elektrizitätserzeugung. Je heisser die Fernwärme betrieben wird, desto geringer ist die Stromausbeute. Wärme- und Elektrizitätsnutzung konkurrieren sich also gegenseitig. Daher gilt auch: Wird eine Kehrichtverbrennungsanlage, die nur Wärme in ein Netz einspeist, mit einem zusätzlichen Stromerzeugungsaggregat ausgerüstet, so verändert sich deren Wirkungsgrad. Die schweizerischen KVA haben je nach Standort ein sehr unterschiedliches Verhältnis von Wärme und Elektrizitätsproduktion. Die Art der Energienutzung wird vor allem durch die Absatzpotenziale der Fernwärme bestimmt. Die KVA in Basel, Bern, Zuchwil, Weinfelden oder Zürich geben den Grossteil ihrer Energie als Wärme an Dritte (Fernwärme, Prozessenergie für Papierindustrie) ab. Ländliche KVA wie beispielsweise Turgi, Niederurnen oder die KVA im Wallis konzentrieren sich mangels Wärmenachfrage vorwiegend auf die Produktion von Elektrizität. Aus diesem Zusammenhang wird klar: Für neue KVA sollte jeweils ein Standort mit ganzjährigen Wärmebezugern gewählt werden.

Aus klimapolitischer Sicht sind zwei verschiedene Effekte von Relevanz. Einerseits führt die Verbrennung des fossilen Anteils der Abfälle zu CO₂-Emissionen, welche ins nationale Treibhausgasinventar einfließen. Sie betragen im Jahr 2010 rund 2.2 Mio. Tonnen CO₂ – dies entspricht etwas über 4 Prozent der gesamten Schweizer Treibhausgasemissionen. Andererseits führt die zunehmende Energienutzung in den KVA zu einer indirekten Abnahme der Schweizer CO₂-Emissionen im Brennstoffbereich, da dadurch die Nutzung fossiler Brennstoffe substituiert wird. (BAFU Faktenblatt).

Die im Rahmen der Beurteilung der Umweltwirkungen relevante Zusatzwirkung der Nutzung von Wärme (z.B. via Einspeisung in ein Fernwärmenetz) und/oder die Produktion von Elektrizität und deren Einspeisung ins elektrische Netz gegenüber einer reinen Entsorgungsanlage hat jedoch eine umgekehrte Wirkung. Auch die Referenzanlage emittiert Treibhausgase und generiert Wärmeenergie, die genutzt werden kann, diese werden jedoch gemäss Figur 1 nicht bewertet (da sie der Abfallentsorgung angelastet werden). Der zusätzlich erzeugte Strom kann jedoch den in anderen Stromerzeugungsanlagen produzierten Strom substituieren, die zusätzlich genutzte Wärme kann die in anderen Wärmeerzeugungsanlagen zu produzierende Wärme ersetzen.

Daher sind erstens die zusätzlichen Treibhausgasemissionen der Stromproduktion in einer KVA der Belastung der Stromproduktion auf der Basis des Kraftwerksparks der Schweiz zu bewerten. Gemäss BUWAL/AWEL 2005 sind die zusätzlichen THG-Emissionen der Stromproduktion marginal. Die CO₂-Belastung der heutigen Stromproduktion aus Wasser- und Kernkraftwerken ist ebenfalls sehr gering. Daher sind die geringen THG-Emissionen der Produktion und Nutzung von Strom in/aus KVA als neutral einzustufen.

Zweitens können durch die Nutzung der in einer KVA anfallenden Wärme fossile Energieträger substituiert werden, die für die Gebäudeheizung genutzt werden. Die (hypothetische) Referenz-KVA, welche die bei der Abfallbehandlung anfallende Wärme nicht nutzt, kann keine fossil basierten Heizanlagen ersetzen. Nach der hier angewandten Methodik werden durch die Nutzung der Wärme aus KVA also die THG-Emissionen anderer fossiler Wärmeerzeugungsanlage reduziert.

Gesamthaft werden durch die Nutzung von Wärme und Strom aus KVA damit THG-Emissionen reduziert.

Schadstoffemissionen

Moderne KVA zeichnen sich dank technologisch hochstehender Abgasreinigung und Rückgewinnung von Metallen aus den Verbrennungsrückständen durch sehr geringe Schadstoffemissionen aus. Dies gilt speziell auch für die Schadstoffemissionen in die Luft.

Wie die Studie BUWAL/AWEL 2005 zeigte, weist die Nutzung von Wärme und Strom aus KVA eine ausgezeichnete Ökobilanz auf. Im Vergleich zur Referenz-KVA weist die Stromproduktion in KVA vernachlässigbare Emissionen von Schadstoffen aus.

Lärm

Da KVA Industrieanlagen sind, welche nur in Bauzonen realisiert werden können, in denen höhere Lärmwerte zulässig sind, werden die durch den Betrieb von KVA in diesem Umfeld entstehenden zusätzlichen Lärmemissionen als geringfügig betrachtet. Es ist davon auszugehen, dass der Lärm der Betriebsstoffanlieferung und der Betrieb an sich durch betriebliche und bauliche Massnahmen auf ein verträgliches Mass reduziert werden kann.

Die Stromproduktion erfolgt in KVA mittels einer Dampfturbine, die gegenüber einer reinen Entsorgungsanlage zusätzliche Lärmemissionen verursacht. Es liegen jedoch keine spezifischen Daten zu den zusätzlichen Geräuschemissionen der Stromproduktion vor. Angesichts der heutigen Kapselung von Dampfturbinen zur Elektrizitätsproduktion wird davon ausgegangen, dass die zusätzlichen Lärmemissionen der Stromproduktion in KVA im Vergleich zur Referenz-KVA vernachlässigbar sind.

**Ausgangslage,
Bedeutung der
Technologie**

In den schweizerischen KVA werden jährlich rund 3.5 Mio. Tonnen Abfälle verbrannt. Praktische alle KVA nutzen die dabei entstehende Energie zur Produktion von Strom und – wo dies möglich ist – auch als Fernwärme. Aktuell liefern die KVA in der Schweiz knapp 1.8 TWh Strom ins schweizerische Netz. Dies entspricht knapp 3% der gesamten Nettoelektrizitätsproduktion der Schweiz. Rund die Hälfte der in KVA erzeugten Energie (Wärme und Strom) stammt aus Biomasse im Abfall und ist somit erneuerbare Energie.¹⁸ Die Verbrennung biogener Abfälle in KVA liefert daher heute rund 0.9 TWh Strom als erneuerbare Energie ins Netz. Damit sind die Kehrichtverbrennungsanlagen heute (neben der Wasserkraft) die mit Abstand bedeutendste Technologie zur Stromproduktion auf der Basis neuer erneuerbarer Energien.

Der Absatz von Wärme und Dampf aus Abfall in der Schweiz liegt jährlich bei rund 3 TWh. Dies entspricht dem Heizenergiebedarf von Wohnungen mit rund 700'000 Einwohnern (BAFU-Faktenblatt).

**Aussichten, Zu-
künftige Entwick-
lungspotenziale**

Die Menge der in KVA verbrannten Siedlungsabfällen liegt seit 2005 etwa konstant bei rund 3.5 Mio. Tonnen pro Jahr. Die Gesamtkapazität der schweizerischen KVA liegt seit 2005 knapp darüber (2010: 3.75 Mio. t). Es ist nicht davon auszugehen, dass Abfallmenge oder Kapazität der KVA in den nächsten Jahren wesentlich zu- resp. abnimmt.

Dennoch gibt es bei den bestehenden KVA ein erhebliches, zusätzliches Energienutzungspotenzial. Dieses ist jedoch schwierig zu ermitteln, da jede KVA über unterschiedliche Anteile an Strom und Wärme produzierte und über unterschiedliche, den Wirkungsgrad bestimmende, technische und betriebliche Parameter verfügt. Die Energienutzung einer bestehenden KVA kann grundsätzlich erhöht werden durch:

- eine Steigerung der Wirkungsgrade der Energienutzung,
- eine Reduktion des Eigenbedarfs an Strom (Betriebsoptimierung),
- einer Erweiterung der Anlage zur Energienutzung.

Der mittlere Wirkungsgrad der Elektrizitätsproduktion¹⁹ liegt heute bei den KVA in der Schweiz erst bei rund 15%, gute Anlagen können aber heute schon Wirkungsgrade von über 20% erreichen. Hochleistungskesselanlagen (z.B. in Holland) erreichen heute 30%, und bis in ca. zehn Jahren werden von Fachspezialisten Wirkungsgrade von gegen 40% erwartet. Dieser Wert sinkt auf etwa 35%, wenn eine gleichbleibende Fernwärmenutzung wie heute angenommen wird (Müller 2004).

Es kann davon ausgegangen werden, dass ein Grossteil der Schweizer KVA ihre Energieproduktionsanlagen in den nächsten 10 bis 15 Jahren erneuern oder ersetzen muss. Gemäss Econcept 2004 kann im Zuge dieser Erneuerungen ein zusätzliches Elektrizitätsproduktionspotenzial von rund 0.3 TWh/a erschlossen werden (das entspricht knapp 20% der heutigen Stromproduktion der KVA). Aufgrund einer Umfrage unter den KVA Betreibern liegt das Potenzial für die zusätzliche Wärmenutzung in KVA in der gleichen Grössenordnung (Econcept 2004). Die genannten Potenziale von Wärme- und Stromproduktion können jedoch nicht zum Gesamtpotenzial der zusätzlichen Energienutzung in schweizerischen KVA zusammengezählt werden. Für dieses sind keine konkreten belastbaren Zahlen verfügbar. Obwohl zahlreiche KVA-Projekte existieren, sind diese oft wenig konkretisiert und es ist fraglich, ob diese im genannten Zeitraum je zur Ausführung gelangen.

Unter Berücksichtigung des vorhandenen Wirkungsgradsteigerungspotenzials sowie bei entsprechenden Anreizen wird das zusätzliche Energienutzungspotenzial in KVA bis 2050 in der Grössenordnung von 0.5 bis 1 TWh/a geschätzt.

¹⁸ Rund 50 Prozent des Abfalls, der in der Schweiz in KVA gelangt, besteht aus erneuerbaren Ressourcen. Seit Ende 2008 wird der Strom aus dem erneuerbaren Anteil des Abfalls in KVA vom Verein für umweltgerechte Energie (VUE) als „Ökostrom“ mit dem Schweizer Qualitätslabel "naturemade basic" ausgezeichnet. Seit dem 1.1.2008 ist das neue Stromversorgungsgesetz (StromVG) in Kraft, das auch für KVA unter bestimmten Bedingungen eine kostendeckende Einspeisevergütung ermöglicht.

¹⁹ Definiert als Elektrizitätsproduktion geteilt durch den Energieinput minus Wärme.

Chancen

Angesichts der erwarteten Zunahme des Anteils der erneuerbaren Stromproduktion aus dezentralen Erzeugungsanlagen mit fluktuierender Produktion kommt der Stromproduktion in Biomasseanlagen und speziell derjenigen in KVA eine zunehmende Bedeutung hinsichtlich der Stabilität und Regelbarkeit der elektrischen Energieversorgung zu. Sie sind die einzigen Vertreter der Erzeugungsanlagen auf der Basis neuer erneuerbarer Energien, deren Beitrag nicht stochastisch anfällt, sondern plan- und regelbar ist.

Bei der Betrachtung gemäss der in diesem Faktenblatt angewandten Methodik (Primäraufgabe der KVA ist Abfallentsorgung) zeichnen sich die KVA durch eine im Vergleich mit anderen Energiesystemen hervorragende Ökobilanz aus. Aus demselben Grund liegen auch die Gestehungskosten pro kWh (falls nur die Zusatzkosten des Stromerzeugungsanteils gerechnet werden) sowohl im Vergleich mit den Gestehungskosten der Stromproduktion auf Basis anderer erneuerbarer Energien als auch im Vergleich zu rein fossilen mittelgrossen WKK-Anlagen deutlich tiefer. Mit steigendem Ölpreis dürfte das Verhältnis auf 1:4 zugunsten der KVA anwachsen (BFE 2004).

Als ökologisch besonders sinnvoll wird die Sanierung der Energiegewinnungssysteme der bestehenden KVA in den nächsten 10 bis 15 Jahren betrachtet. Durch die erwarteten Wirkungsgradsteigerungen könnte der Beitrag der heutigen KVA zur Nutzung von Wärme und Strom aus erneuerbaren Energien um eine Grössenordnung von mindestens 30% (des Stromproduktionsanteils) bzw. mindestens 10% (des Wärmenutzungsanteils) gesteigert werden, ohne dass sich dadurch die Umweltbelastung dieser Anlagen nennenswert vergrössert.

Risiken

Wenn bestehende KVA weitgehend erneuert werden und im Zuge der Sanierungsarbeiten eine Steigerung von Wirkungsgrad und Energieproduktion angestrebt wird, gibt es gemäss BFE 2004 zumindest zwei grosse Hindernisse für solche umfassenden Sanierungen:

- Vor allem bei Anlagen, die sowohl Wärme als auch Strom produzieren, sind die effizientesten Technologien nicht wirtschaftlich. Der Mehraufwand für die Steigerung des Wirkungsgrads auf über 30% elektrisch kann zurzeit noch nicht quantifiziert werden. Es ist davon auszugehen, dass bei einem zukünftigen Ersatz nicht die energieeffizientesten Anlagen zum Einsatz kommen, da diese unter normalen Umständen keinen kostendeckenden Betrieb ermöglichen.
- Eine Steigerung der Stromproduktion fällt bei sämtlichen KVA mit Wärmenutzung im Sommer bei tiefen Einspeisetarifen an, wenn für die Wärme aus den KVA ein Überschuss besteht.²⁰

Handlungsbedarf/-ansätze

- Energetische Mindestanforderung an neue KVA: Neue KVA oder massgebende Erweiterungen sollen gewisse energetische Mindestanforderungen erfüllen.
- Für die KVA ist heute die Nutzung der bei der Verbrennung anfallenden Wärme vorgeschrieben (TVA, Art. 38). Im Rahmen der laufenden Gesamtrevision der TVA wird geprüft, ob neu ein Mindestwirkungsgrad für Neuanlagen vorgeschrieben werden soll (BAFU-Faktenblatt).
- Planung der Verbrennungskapazitäten: Die Abfallentsorgung und somit auch die KVA liegen in kantonaler Kompetenz. Das BAFU koordiniert die Abfallplanung der Kantone soweit notwendig.
- Die Kantone werden dazu angehalten, keine unnötigen Kapazitäten zu errichten und sich am Bedarf zu orientieren. Bei Standortwechseln von KVA soll auch die alternative Wärmeherzeugung für allfällige Wärmebezügler am bisherigen Standort thematisiert werden (BAFU-Faktenblatt).
- Ausbau der energetischen Nutzung von Biomasse in KVA: Die Prinzipien der

²⁰ Im Sommer ist zudem die Stromproduktion auf Basis erneuerbarer Energien (v.a. Wasserkraft- und PV-Anlagen) deutlich höher als im Winter. Im Extremfall könnte bei einer massiven Förderung von PV- und Windanlagen in ferner Zukunft an schönen, windigen Sommerwochenenden auch in der Schweiz Strom im Überschuss zur Verfügung stehen (wie seit 2011 öfters in Deutschland).

Biomassestrategie des Bundes gelten auch für die KVA. Dazu gehören insbesondere das Prinzip der stofflichen Nutzung vor der energetischen Nutzung und die optimierte Nutzung von Nährstoffen.

- Die Biomassestrategie ist hinsichtlich möglicher Standortänderungen von KVA zu überprüfen (BAFU-Faktenblatt).
- Die Luftreinhalte-Verordnung (LRV) limitiert in Anhang 2, Ziff. 71 und im Anhang 1 die Luftschadstoff-Emissionen von KVA. Sie schreibt auch vor, welche Schadstoffe kontinuierlich gemessen werden müssen und legt für KVA eine Mindestgrösse von 350 kW Feuerungswärmeleistung fest (BAFU-Faktenblatt).
- Revidiertes CO₂-Gesetz: Das revidierte CO₂-Gesetz nach 2012 gibt dem Bundesrat die Möglichkeit, die Kehrichtverbrennungsanlagen zur Teilnahme am Emissionshandelssystem (ETS) zu verpflichten. Dass er dies zu tun gedenkt, deutete der Bundesrat bereits in der Botschaft zur zukünftigen Klimapolitik nach 2012 (BBI 2009 7433ff insb. 7474f) an (BAFU-Faktenblatt).

Instrumente zur Minimierung der Umweltwirkungen

Weitere Aspekte

Wie bereits eingangs erwähnt, ist die primäre Aufgabe der KVA die optimale Behandlung von Abfällen; die Optimierung der Energieproduktion kommt erst an zweiter Stelle. Die Zusammenhänge zwischen Abfallwirtschaft und Energiewirtschaft sind jedoch äusserst komplex. Wird eine Steigerung der Energieproduktion angestrebt, müssen insbesondere folgende Punkte beachtet werden (BFE 2004):

- Interessenskonflikt entsorgungsoptimierte Anlagen („deponie-geführte“ KVA) vs. energieoptimierte Anlagen: KVA sollten auch in Zukunft primär im Hinblick auf die Minimierung der Belastung durch die anfallenden Reststoffe sowie auf die Minimierung der Schadstoffemissionen ausgelegt und optimiert werden. Die energetische Optimierung bleibt ein sekundäres Kriterium (z.B. schlechter Ausbrand der Schlacke bei Optimierung bezüglich Stromerzeugung).
- Die KVA stehen unter einem erheblichen Kostendruck. Zwar haben sie einerseits im Bereich der Haushaltsabfälle ein faktisches Gebietsmonopol, andererseits herrscht beim Abfall aus Industrie und Gewerbe grosse Konkurrenz unter den KVA. In der Praxis helfen die Erträge aus der Energienutzung, die Kehrichtentsorgungspreise zu senken. Bei sinkenden Stromerlösen müssen die Ausfälle mittelfristig via Erhöhung der Abfallannahmepreise kompensiert werden. Umgekehrt reduzieren steigende Abfallannahmepreise den Kostendruck.

Literatur

- BAFU 2011 (unveröffentlicht):** internes Faktenblatt Energie aus KVA (Kehrichtverbrennungsanlagen) der BAFU KoKo Energie, Version 2.3.2011
- BFE 2004:** Potenziale zur energetischen Nutzung von Biomasse in der Schweiz, EWG-Studie, INFRAS et al i.A. von BFE, Bern, Dezember 2004
- BFE 2011:** Grundlagen für die Energiestrategie des Bundesrates; Frühjahr 2011 – Aktualisierung der Energieperspektiven 2035 (energiewirtschaftliche Modelle). Prognos
- BUWAL/AWEL 2005:** Ökobilanz für Energie aus Kehrichtverbrennungsanlagen (KVA), Studie verfasst von G. Doka, Bern/Zürich, Juni 2005
- Econcept 2004:** Kosten und Entschädigung von Strom aus Kehrichtverbrennungsanlagen, Studie im Auftrag des Bundesamtes für Energie, Zürich, Juni 2004.
- Müller E.A. 2004:** Internes Arbeitspapier zum Thema energetische Nutzung von Biomasse in KVA, Zürich, September 2004.

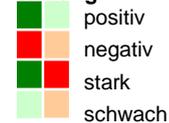
Energiestrategie 2050 – Umweltwirkungen Technologie

Beurteilungsblatt Technologie Nr. 7

Technologietyp: **Fossile Strom- und Wärmeproduktion mit WKK- und GuD-Anlagen**
Varianten: Fossile Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen (WKK) (dezentral, wärmegeführt)
 Gas-und-Dampf-Kombikraftwerk (GuD)
Version / Datum: Version 2, 25. April 2012
Verfasser/in: C. Bieler (INFRAS)

Wichtigste Umweltwirkungen

- WKK- und GuD- Anlagen haben hohe Treibhausgasemissionen, ca. 90% der THG-Emissionen fallen in der Betriebsphase bei der Verbrennung an.
- Sowohl beim Bau als auch im Betrieb weisen WKK und GuD-Anlagen hohe Luftschadstoffemissionen aus.

Wirkung:

 positiv
 negativ
 stark
 schwach
in Phase:
 H: Herstellung
 R: Realisierung, Bau
 B: Betrieb
 S: Stillleuna

	Naturräume, Artenvielfalt			Klima	Schadstoffe, Lärm, NIS			Risiken	
	Biodiversität	Landschaftliche Vielfalt	Flächennutzung	Treibhausgase/fossile Energie	Schadstoffe	Lärm	Nicht ionisierende Strahlung	Naturgefahren	Störfall
Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen (WKK)				H, B	H, B				
GuD-Anlagen (Stromgeführt)		R, B	R, B	H, B	H, B	R			

Beurteilung: Naturräume und Artenvielfalt

Bei WKK-Anlagen werden die Umweltauswirkungen für alle drei Indikatoren des Bereichs Naturräume und Artenvielfalt als vernachlässigbar beurteilt. Für Gas-und-Dampf-Kombikraftwerke ergibt die Beurteilung eine schwach negative Auswirkung in den Bereichen landschaftliche Vielfalt und Flächennutzung.

Gas-und-Dampf-Kombikraftwerk (GuD-Anlagen):
 Die Biodiversität wird durch GuD-Anlagen im gleichen Masse beeinflusst wie z.B. durch andere industrielle Anlagen. Dies bedeutet, dass die verbaute Fläche nicht mehr zur Verfügung steht für Flora und Fauna, eine konkrete Bedrohung für gewisse Arten lässt sich daraus aber nicht ableiten. Der Einfluss der Anlage (z.B. Kühltürme) auf die landschaftliche Vielfalt hängt stark vom Standort und dem Anlagendesign selbst ab.

Die Beeinträchtigung der Landschaft an Orten mit bereits bestehender industrieller Nutzung oder bereits vorhandenen rauchproduzierenden Anlagen (z.B. KVA) ist folglich deutlich kleiner als an Standorten, wo noch keine derartige Anlage vorhanden ist. Da in der vorliegenden Untersuchung keine bestehenden Anlagen ins Umfeld projiziert werden, wird der Einfluss der Kraftwerke auf die landschaftliche Vielfalt als schwach negativ bewertet (Eigener Eindruck nach Betrachtung von Arcadis 2008, LTU Planungstechnik 2010.) Das Versiegelungspotential und somit die Flächennutzung hängt von der Grösse der Anlage ab. Eine geplante Beispielanlage in Riedersbach (Salzburg, Österreich) mit 400 MWel hat eine Grösse von ca. 250m x 50m. Wird die Anlage auf einer bereits versiegelten Fläche, z.B. in einem Industriegebiet, realisiert, so könnte dies vernachlässigt werden. Die Grösse der Installationsfläche ist entsprechend projektabhängig (LTU Planungstechnik 2010, eigener Eindruck). Da der Bau dieser Anlagen UVP-pflichtig ist (ab einer Feuerungsleistung von über 100 MWth), kann davon ausgegangen werden, dass die Auswirkungen im gesetzlichen Rahmen sind. Trotzdem wird eine gewisse Fläche irreversibel verbaut und die Auswirkung auf die Flächennutzung als schwach negativ bewertet.

Fossile Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen (WKK):

Von den knapp 1000 WKK-Anlagen in der Schweiz sind ca. 95% sogenannte Klein-WKK-Anlagen, die vor allem in Kläranlagen, Bürogebäuden, Spitälern, Heimen, Wohngebäuden, Gewerbe- und Industriebetrieben eingesetzt werden. Die Gross-WKK werden in der Papier-, Chemie- und mineralölverarbeitenden Industrie eingesetzt. Beide Anlagentypen sind somit Teile bestehender Industrie- oder Wohnzonen mit bereits versiegeltem Untergrund. Wie auch bei den GuD-Anlagen hängen die Auswirkungen auf die Naturräume und Artenvielfalt von den einzelnen Projekten ab und können fast nur auf der Basis konkreter Projekte untersucht werden. Allgemein lässt sich sagen, dass die Auswirkungen von WKK-Anlagen auf die Biodiversität, die landschaftliche Vielfalt und die Flächennutzung in der jetzigen Situation in der Schweiz vernachlässigbar ist.

Treibhausgase und Fossile Energieträger

Die Umweltwirkungen in Bezug auf die Treibhausgasemissionen und der Verbrauch fossiler Energieträger werden, über den gesamten Lebenszyklus gesehen, bei den stromgeführten GuD als stark negativ, jene der wärmegeführten WKK als leicht negativ beurteilt.

Rund 90% der THG-Emissionen werden in der Betriebsphase verursacht. Dazu kommen, wie für praktisch alle Strom- und Wärmeerzeugungsanlagen, die THG-Emissionen in der Phase der Realisierung.

Das Treibhausgaspotential der beiden Technologien unterscheidet sich weniger durch die Technologie als vielmehr durch den verwendeten Brennstoff. Bei den GuD-Anlagen ist Gas der Hauptbrennstoff, bei den WKK-Anlagen ist es heute hauptsächlich Heizöl, in Zukunft dürfte es vermehrt Gas sein (WKK-Anlagen können je nach Ausführung mit Öl, Gas oder biogenen Brennstoffen betrieben werden).

Da die Anlagen unterschiedlich gross sind, erscheint es als sinnvoll, das Treibhausgaspotential mittels Beispielen zu erläutern. Eine GuD-Anlage im Erdgasbetrieb mit Wärmeauskoppelung, mit einem Gesamtwirkungsgrad von ca. 80%, produziert etwa 240 g CO₂-Äquivalente pro kWh_{th}. Bei rein elektrischem Betrieb sinkt der Wirkungsgrad auf ca. 60%, und die Emissionen steigen auf 400 g CO₂-eq/kWh_{el}. Dieser Unterschied prägt die Umweltanalyse zu Gunsten der wärmegeführten Anlagen aus. Bei beiden Betriebsarten werden rund 90% der CO₂-Emissionen bei der Verbrennung des Gases verursacht. Der Rest verteilt sich auf die vorgelagerte Gasproduktion, den Umschlag und den Transport (Modahl 2011; Piot 2010, IER et al. 2004). Mit der Nachrüstung einer Einrichtung zur Abscheidung und Lagerung des CO₂ (Carbon Capture and Storage), die allerdings frühestens ab 2020 verfügbar sein wird, kann der Nachteil der hohen CO₂-Emissionen zukünftig möglicherweise reduziert werden (Axpo 2012, Online).

Da WKK-Anlagen sowohl mit Öl als auch mit Gas betrieben werden, soll hier noch auf den Unterschied des Treibhausgaspotenzials der beiden Brennstoffe hingewiesen werden. Im Betrieb der Anlagen emittiert ein Blockheizkraftwerk (BHKW) zur Produktion von Wärme und Strom betrieben mit Öl ca. 350 g CO₂/kWh_{th}. Ein ähnliches BHKW betrieben mit Erdgas emittiert, wie im Beispiel oben beschrieben, ca. 240 g CO₂/kWh_{th} (V3E 2011). Ein wärmegeführtes Erdöl BHKW emittiert somit in der Bilanz weniger THG Emissionen als ein nur stromgeführtes Erdgas BHKW.

Schadstoffemissionen/Immissionen

Die Auswirkungen der Schadstoffemissionen auf die Umwelt werden während der Herstellungs- und Betriebsphase der stromgeführten GuD als negativ und gross, jene der wärmegeführten WKK als leicht negativ bewertet. Dies hat folgende Gründe:

Auf die Verbrennung entfallen um die 70% der Stickoxidemissionen, dies ist im Normalbetrieb zwischen 15–25 ppm. Methan- und Schwefeldioxidemissionen hingegen entfallen zu weit über 90% auf die vorgelagerte Prozesskette der Erdgasbereitstellung und hängen davon ab, ob das Gas zu Geruchszwecken mit Schwefeldioxiden angereichert wurde. Dies zeigt deutlich die Relevanz des Prozesses der Brennstoffbereitstellung bezüglich der Höhe der Umweltwirkung. Eine Angabe über die Grössenordnung der Emissionen ist schwierig. Jedoch ist deren Anteil absolut betrachtet mindestens ca. 100mal kleiner als die CO₂-Emission in g pro erzeugte kWh (IER 2004). Aufgrund des tieferen Wirkungsgrads von stromgeführten Anlagen sind deren Schadstoffemissionen pro kWh wesentlich höher als Schadstoffemissionen von wärmegeführten Anlagen. In der industriellen Sparte sind die Luftschadstoffemissionen generell unter den Grenzwerten der Luftreinhalteverordnung (LRV). Verglichen mit anderen Technologien sind die Luftschadstoffemissionen in der Vorprozesskette und im Betrieb relativ hoch.

Lärm

In Bezug auf Lärm wird die Wirkung von GuD-Kraftwerken aufgrund des Baulärms in der Realisierungsphase als leicht negativ beurteilt.

Die Lärmwirkung der WKK-Anlagen wird sowohl im Bau wie auch im Betrieb als vernachlässigbar beurteilt. Grund dafür ist die Einstufung von WKK-Anlagen als Industrieanlagen, welche nur in den entsprechenden Bauzonen, in denen höhere Lärmwerte zulässig sind, realisiert und betrieben werden können. Es ist davon auszugehen, dass der Lärm der Brennstoffanlieferung und des Betriebs an sich durch betriebliche und bauliche Massnahmen auf ein verträgliches Mass reduziert werden kann.

Ausgangslage, Bedeutung der Technologie

Im Jahr 2010 waren in der Schweiz 966 WKK-Anlagen mit einer elektrischen Nennleistung von 597 MW in Betrieb. Diese WKK-Anlagen produzierten im Jahr 2010 1.3 TWh_{el}. Der Trend zeigt Richtung weniger, dafür grösseren Anlagen. Durchschnittlich sind zwischen 2005 und 2010 jährlich 14 Anlagen abgebaut worden. Im langjährigen Trend der Stromproduktion durch WKK-Anlagen konnte eine Stagnation festgestellt werden, allerdings mit einem Anstieg im Jahr 2010 (BFE 2011).

Aussichten, Zukünftige Entwicklungspotenziale

Die Energiestrategie 2050 geht von einem realisierbaren WKK-Potenzial (inkl. GuD-Kraftwerken) von 24 TWh im Jahr 2050 aus. 5% davon (1.3 TWh) werden bereits genutzt. Das Restpotenzial beträgt knapp 23 TWh, wovon zwischen 5 und 7 TWh elektrisch nutzbares Potenzial ist. Dieses Potenzial wird nur mit Hilfe von Fördermassnahmen ausgeschöpft werden können, da WKK zum heutigen Zeitpunkt nicht wirtschaftlich sind. Zudem ist das hier genannte Potenzial nur über Fernwärmeprojekte erschliessbar (BFE 2011b).

Chancen

Die WKK- und GuD-Technologien sind weit entwickelte, zuverlässige und bewährte Technologien. Ausserdem haben vor allem GuD-Anlagen eine hohe Regelbarkeit der Stromerzeugung, was sie aus Sicht der Abstimmung von Stromproduktion und -nachfrage und damit der Versorgungssicherheit zu einem interessanten Bestandteil der zukünftigen Schweizer Stromversorgung ohne Kernkraftwerke, dafür einem höheren Anteil der stochastisch anfallender erneuerbaren Energien macht.

Die ausgereifte Technologie ist serienmässig produzierbar, was mit tiefen Kapitalkos-

ten einhergeht.

Der Zeitbedarf für die Realisierung von WKK- und GuD-Anlagen ist – v.a. im Vergleich zu anderen grossen Kraftwerken auf der Basis erneuerbaren Energien, z.B. mittlere und grosse Wasserkraftwerke – sehr moderat. In der Schweiz braucht die Realisierung einer grösseren GuD-Anlage fünf bis sieben Jahre, im Ausland können GuD-Kraftwerke deutlich rascher gebaut werden. Die Installation einer WKK-Anlage ist je nach Grösse innerhalb weniger Monate machbar.

Kleinere WKK- und GuD-Anlagen können in Zukunft auf biogene Brennstoffe (Biogas) umgerüstet oder zumindest mit gemischten Brennstoffen (z.B. 10–20% Biogas, 80–90% Erdgas) betrieben werden.

Risiken

Die Primärenergieträger für die Befeuerung der WKK- und GuD-Anlagen sind erschöpfliche, nicht erneuerbare Brennstoffe. Gasförderung und -transport sind nicht risikofrei.

Technologien mit fossilen Brennstoffen sind sensitiv auf Brennstoffkosten, Brennstoffbesteuerung und CO₂-Abgabem.

WKK-Anlagen sind weniger flexibel, da sie wärmegeführt gefahren werden. Sie benötigen Wärmeabnehmer in Form von Industrie oder Siedlungen (Winterhalbjahr).

Geringe Akzeptanz bei der Bevölkerung und den Behörden für fossile Stromerzeugung.

Handlungsbedarf/ Handlungsansätze

Die Rahmenbedingungen für die Nutzung von Strom- und Wärme sollten sicherstellen, dass es sich lohnt, eine WKK-Anlage zu installieren, falls bei einem Heizkesseleratz kein auf erneuerbaren Energieträger basierendes Heizsystem eingesetzt werden kann. Ohne Anreize wird dieser Substitutionsprozess, der viel zur Erhöhung der Energieeffizienz auf der Produktionsseite beiträgt, nicht vollzogen werden.

Instrumente zur Minimierung der Umweltwirkungen

Im Rahmen der Totalrevision des CO₂-Gesetzes und vor dem Hintergrund der Neuausrichtung der schweizerischen Energiepolitik haben die eidgenössischen Räte im Dezember 2011 entschieden, dass fossil-thermische Kraftwerke ab dem 1. Januar 2013 maximal 50 Prozent der CO₂-Emissionen mit Massnahmen im Ausland kompensieren dürfen. Gemäss den Massnahmen der Energiestrategie 2050, die der Bundesrat am 18.4.2012 präsentierte, sollen allerdings Schweizer GuD-Betreiber die verursachten CO₂-Emissionen wie ihre europäischen Konkurrenten auch durch die Ersteuerung von Emissionsrechten abdecken können (via Anschluss an das europäische Emissionshandelssystem (ETS)).

Die gesetzlichen Bestimmungen werden mit der Verordnung über die Kompensation der CO₂-Emissionen fossil-thermischer Kraftwerke (CO₂-Kompensationsverordnung) konkretisiert. Der Bundesrat hat die Verordnung am 24. November 2010 verabschiedet. Sie ist zusammen mit dem geänderten CO₂-Gesetz am 1. Januar 2011 in Kraft getreten. In der CO₂-Kompensationsverordnung wird insbesondere der Gesamtwirkungsgrad festgelegt, den fossil-thermische Kraftwerke mindestens erreichen müssen. Dieser Gesamtwirkungsgrad liegt, gemäss dem Willen des Parlaments, so hoch, dass die Betreiber fossil-thermischer Kraftwerke dazu verpflichtet sind, nebst Strom auch die anfallende Wärme zu nutzen. Davon ausgenommen sind Kraftwerke an bestehenden Standorten.

Weiter konkretisiert die CO₂-Kompensationsverordnung, dass Investitionen in erneuerbare Energien im Umfang der vermiedenen CO₂-Emissionen als Kompensationsmassnahme angerechnet werden dürfen.

Gemäss den gesetzlichen Bestimmungen müssen die Betreiber fossil-thermischer Kraftwerke – vor dem Einreichen der Baubewilligung an die Kantone – mit dem Bund einen Vertrag über die Kompensation der verursachten CO₂-Emissionen abschliessen. In der CO₂-Kompensationsverordnung wird der erforderliche Inhalt dieses Vertrags konkretisiert.

Weitere Aspekte**Ökobilanz**

Die Bereitstellung von einer Kilowattstunde Strom über den gesamten Lebensweg wirkt sich je nach Kraftwerktechnologie sehr unterschiedlich auf die Umwelt aus. Laut Frischknecht (2010) beträgt die Umweltbelastung von Strom an der Steckdose, produziert in einer GuD-Anlage (neue Technologie), ca. 270 UBP06 (Umweltbelastungspunkte 2006). Die Luftbelastung macht dabei über 80% der Belastung aus.

Literatur

Arcadis 2008 : Zusatzbewertung Landschaftsbild auf ROV Ebene. Neubau Block 6, Kraftwerk Staudinger, Grosskrotzenburg. Darmstadt.

http://www.dfld.de/Andere/Staudinger/ROV/GSt_ROV_Labi00_080808.pdf, gesichtet am 8.12.2012.

Axpo 2012, Online: Gas-Kraftwerk Broschüre,

[http://axpo.ch/content/axpo/de/home/wissen/technologien/gas-](http://axpo.ch/content/axpo/de/home/wissen/technologien/gas-kraft-)

[kraft-werk/_jcr_content/content/download_0/downloads/gas_kraftwerk_brosch/file.res/111212_AXP_GUD_rts.pdf](http://axpo.ch/content/axpo/de/home/wissen/technologien/gas-kraft-werk/_jcr_content/content/download_0/downloads/gas_kraftwerk_brosch/file.res/111212_AXP_GUD_rts.pdf), gesichtet am 28.02.2012

BAFU/BFE 2008/2011: Klimaschutzprojekte in der Schweiz - Vollzugsweisung zur Durchführung von Kompensationsmassnahmen, Ausgabe 2011, Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern

BFE 2011: Thermische Stromproduktion inklusive Wärmekraftkopplung (WKK) in der Schweiz, Ausgabe 2010, Bundesamt für Energie, Bern

BFE 2011b: Potenzial der Elektrizitätsproduktion der erneuerbaren Energien, Grundlagen für die Energiestrategie des Bundesrates

BFE 2012, Online: Thema Energieeffizienz, Wärmekraftkopplung (WKK);

<http://www.bfe.admin.ch/themen/00490/00506/index.html?lang=de>, gesichtet am 24.02.2012

Frischknecht 2010: Ökobilanz verschiedener Kraftwerkstechnologien, PUSCH, Thema Umwelt 4/2010

IER et al. 2004: Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Universität Stuttgart, in Zusammenarbeit mit DLR, FFE, LEE, Lebenszyklusanalysen ausgewählter zukünftiger Stromerzeugungstechniken, Ein Forschungsvorhaben mit finanzieller Unterstützung des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit Stuttgart/Bochum/München.

Kaiser, T. 2005: Kombi-Kraftwerke (GuD), Alternative und Ergänzung im zukünftigen Schweizer Strommix.

LTU Planungstechnik 2010: Errichtung des GuD Kraftwerks Ridersbach.

[http://www.land-oberoesterreich.gv.at/cps/rde/xbcr/SID-DE526993-8135FBC8/oe/B09_Landschaft.pdf Zugriff: 8.12.2011].

LRV 2010: Luftreinhalte-Verordnung vom 16. Dezember 1985 (LRV), Stand 15. Juli 2010

Modahl, I., Nyland, C., Raadal, H., Karstad, O., Torp, T., Hagemann, R. 2011: Life cycle assessment of gas power with CSS - a study showing the environmental benefits of system integration. Energy Procedia. Vol. 4, 2470-2477.

Piot, M. 2010: Wärmekraftkopplung in der Schweiz. gwa, Nr. 2, 2010.

V3E 2011: Verband Effiziente Energieerzeugung, V3E Standardfolien Version 11, Stand Feb. 2011

Energiestrategie 2050 – Umweltwirkungen Technologien

Beurteilungsblatt Technologie Nr. 8

Technologietyp: **Elektrizitätsnetz**
umfasst: **Freileitungen: Übertragungsnetz ≥ 220 kV, überregionale und regionale Verteilnetze ≤ 150 kV**
Unterirdische Leitungen (Kabel): Übertragungsnetz ≥ 220 kV, überregionale und regionale Verteilnetze ≤ 150 kV
Unterwerke
Version/Datum: Version 2, 25. April 2012
Verfasser/in: B. Oettli (INFRAS)

Wichtigste Umweltwirkungen

- Freileitungen können das Landschafts- und Ortsbild stark beeinträchtigen. Das Ausmass ist stark abhängig von der Landschaft, durch welche die Freileitung hindurch führt. Unterirdische Leitungen durch den Wald sind auch nach Jahren noch wahrnehmbar und können zu einer Beeinträchtigung des Landschaftsbildes führen.
- Freileitungen und Unterwerke sind starke Quellen für NIS.
- Freileitungen sind Risikofaktoren für Vögel. Die grössten Gefahren sind Lebensraumverlust, Kollision mit Erdleitern und Leitern sowie Stromschlag.
- Unterirdische Leitungen können Boden, Grundwasser und in seltenen Fällen auch Oberflächengewässer negativ beeinflussen (z. B. Bodenverdichtung, Beeinflussung Grundwasser, Unterquerung von Fließgewässern)

Wirkung:
■ positiv
■ negativ
■ stark
■ schwach

in Phase:
 H: Herstellung
 R: Realisierung, Bau
 B: Betrieb
 S: Stilllegung, Rückbau

	Naturräume, Artenvielfalt			Klima	Schadstoffe, Lärm, NIS			Risiken	
	Biodiversität	Landschaftliche Vielfalt	Flächennutzung		Treibhausgase/ fossile Energie	Schadstoffe	Lärm	Nicht ionisierende Strahlung	Naturgefahren
Freileitungen	B	B	R, B			R, B	B		
unterirdische Leitungen (Kabel)	B	R, B	R, (B)			R			

Beurteilung

Vorbemerkung

Höchst- und Hochspannungsleitungen (≥ 50 kV) können sich erheblich auf Raum und Umwelt auswirken. Dabei zeigen sich, je nachdem ob sie als Freileitungen oder als unterirdische Leitungen (Kabel) ausgeführt werden, gewisse Unterschiede. Freileitungen führen zu weniger Eingriffen in der Bauphase, ziehen aber Beeinträchtigung des Landschaftsbildes durch Masten und Waldschneisen nach sich und wir-

ken sich auf den Menschen in Form von nichtionisierender Strahlung (NIS) und Lärm aus.

Boden, Grundwasser und Oberflächengewässer werden durch den Bau und Betrieb einer unterirdischen Leitung weit stärker beeinträchtigt als durch eine Freileitung. Zudem können Kabeltrassen, falls sie durch Waldabschnitte führen, ebenfalls als Waldschneisen sichtbar sein. Im Folgenden werden die Umweltwirkungen von Freileitungen und unterirdischen Leitungen (Kabeln) unter jedem Umweltaspekt separat beleuchtet.

Biodiversität

Die Wirkung von Freileitungen und unterirdischen Leitungen auf die Biodiversität wird als schwach negativ eingestuft.

Freileitungen bergen Risiken für Vögel. Die grössten Gefahren sind Lebensraumverlust, Kollision mit Leitern sowie Stromschlag. Besonders heikel sind Erdseile an Hochspannungsleitungen und Spezialkonstruktionen an Mittelspannungsleitungen. Betroffen sind viele Vogelarten, insbesondere Grossvögel wie Störche, Greife und Eulen. Da die meisten dieser Arten langlebig sind und eine geringe Reproduktionsrate aufweisen, sind solche Ausfälle rasch populationsrelevant. So starb in der Schweiz von 228 Uhus mit bekannter Todesursache ein Drittel an Stromschlag. Ihre Mortalität, beispielsweise im Wallis, ist so hoch, dass sich der Bestand nur dank dauernder Zuwanderung von benachbarten Populationen einigermaßen halten kann (BAFU 2011a). Von den Störchen, deren Todesursache bekannt ist, kam in den letzten Jahren sogar rund die Hälfte wegen Stromleitungen um.

Nötig ist eine geeignete Trassenführung von Freileitungen, die den Vogelschutz durch Vermeidung vogelreicher Gebiete und für den Vogelschutz relevanter Lebensräume, (z.B. Vogelzugkorridore oder Wasser- und Zugvogelreservate) berücksichtigt – oder unterirdische Leitungen. Zudem hilft der Einsatz von vogelsicheren Mastkonstruktionen (z.B. Isolierschläuche an Verbindungen) und die Markierung von Erdleitern und Leitern, die Situation für Vögel beträchtlich zu verbessern (BAFU 2009).

Problematisch sind Freileitungen, die durch ökologisch sensible Gebiete führen, z.B. Schutzgebiete oder Biotope. Insbesondere die Maststandorte dürfen die Biotope nicht beeinträchtigen; dasselbe gilt auch für die unterirdischen Leitungen (EDI 1980).

Die Umweltwirkungen von Freileitungen und unterirdischen Leitungen auf Naturräume und die Artenvielfalt sind differenziert zu betrachten: Niederhaltungen von Wald und Schneisen über Kabelschächten beeinträchtigen zwar das Landschaftsbild, können aber, wenn z. B. nur Büsche gepflanzt werden, zur Aufwertung der Biodiversität eines Raums führen.

Die Auswirkungen der Wärmeentwicklung von unterirdischen Leitungen auf die Bodenbiodiversität sind noch zu wenig bekannt (BAFU 2011a).

Landschaftliche Vielfalt

Die Wirkung von Freileitungen auf die landschaftliche Vielfalt wird als stark negativ beurteilt. Bei unterirdischen Leitungen >220kV können sich die Übergangsbauwerke und allenfalls notwendige Waldschneisen landschaftlich negativ auswirken, sie werden daher ebenfalls als schwach negativ beurteilt.

Freileitungen haben visuelle Auswirkungen auf die Lebensräume von Menschen und Tieren. Für den Bau von Freileitungen und die Verlegung von unterirdischen Leitungen zur Durchquerung von Wäldern muss normalerweise eine Schneise mit späterer Niederhaltung des Aufwuchs geschlagen werden. In günstigen Fällen können Waldgebiete mit entsprechend höheren Masten überspannt werden.

Die Beeinträchtigung der Landschaft ist abhängig von der Trassenwahl und der Qualität der Landschaft, durch welche die Freileitung führt. Eine günstige Farbgebung und geeignete Mastentypen können die negativen Auswirkungen einer Freileitung auf das Landschaftsbild mildern helfen. Die Auswirkungen sind für jeden Ort individuell zu betrachten. Mit geschickt gewählten Linienführungen (Bündeln der Linienführungen unter sich oder mit anderen linearen Infrastrukturen, Beschränkung auf bestehende Korridore im Alpenraum sowie Freihalten von wertvollen Ortsbildern und

geschützten Landschaften) können die Auswirkungen von Freileitungen auf die Landschaft gedämpft werden (BUWAL 1997, BAFU 2011b).

Sind die Auswirkungen auf die Landschaft zu gross, können unterirdische Leitungen realisiert werden. Aber auch unterirdische Leitungen > 200kV haben Auswirkungen auf die Landschaft (z. B. Übergangsbauwerke und Muffenschächte). Zudem muss der Verlegungsbereich frei bleiben von tiefwurzelndem Bewuchs, was im Wald eine landschaftlich unerwünschte Schneise notwendig macht. In Feldern, Wiesen und offenen, weiten Landschaften hingegen ist der Verlauf der Kabeltrasse zwei bis drei Jahre nach Beendigung der Bauarbeiten kaum mehr sichtbar.

Flächennutzung

Die Wirkung von Freileitungen und von unterirdischen Leitungen in Bezug auf die Flächennutzung wird als schwach negativ beurteilt.

Bei Freileitungen ist der dauerhafte Flächenverbrauch im Wesentlichen auf die Maststandorte beschränkt. Im Falle von unterirdischen Leitungen konzentriert sich der Flächenverbrauch auf die Phase des Baus der Trassen bzw. der Erdverlegung der Kabel in Stollen oder Blöcken. Die Trassen können jedoch im Betrieb zum grössten Teil wieder genutzt werden. Die Wiederanpflanzung von tief wurzelnden, hohen Bäumen auf Trassen von unterirdischen Leitungen ist aber nicht mehr möglich.

Für den Bau einer unterirdischen Leitungen >220kV von 1 km Länge werden temporär etwa 1.5 ha Boden beansprucht: für den Bau selber, die Installationsplätze und die Baupisten. Für diesen km werden insgesamt 12'000 m³ Material ausgehoben, nur ein Teil davon kann vor Ort wiederverwertet werden. Etwa ein Drittel des Materials muss abgeführt werden (BAFU 2011a).

Um die Kabel zu verlegen, sind schwere Kabeltrommeln (20 bis 40 t) zu transportieren, so dass ein ausreichend tragfähiger Untergrund erforderlich ist. Nach Möglichkeit sollte der Kabeltransport daher auf bestehenden Strassen erfolgen. Falls dies aufgrund der Trassenführung nicht möglich ist, muss temporär eine Baustrasse oder Baupiste erstellt werden.

Boden, Grundwasser und Oberflächengewässer

Diese werden durch den Bau und Betrieb einer unterirdischen Leitung in der Regel stärker beeinträchtigt als durch eine Freileitung. Insbesondere die Unterquerung von Wasserläufen mit Kabeln stellt im Gegensatz zur Freileitung einen erheblichen Eingriff in den Boden und Wasserhaushalt dar.

Lärm

In Bezug auf Lärm wird die Wirkung von Freileitungen als leicht negativ eingestuft, die Wirkung von unterirdischen Leitungen wird aufgrund des Baulärms in der Realisierungsphase ebenfalls als leicht negativ beurteilt.

Bei Freileitungen sind vor allem die mit einer Nennspannung ab 220 kV betriebenen Stränge relevant. Diese entwickeln insbesondere bei feuchtem Wetter Koronalärm. Als lärm mindernde Massnahmen sind geeignete Oberflächenbehandlungen und der Einsatz von 3er- oder 4er-Bündeln wirksam. Durch eine unterirdische Leitung wird der Lärm im Betrieb ganz beseitigt.

Nicht ionisierende Strahlung (NIS)

Die Umweltwirkung von Freileitungen wird in Bezug auf NIS als stark negativ eingestuft. Die Wirkung von unterirdischen Leitungen auf NIS wird als nicht relevant beurteilt.

Wo Elektrizität erzeugt, transportiert und genutzt wird, entstehen als unvermeidliche Nebenprodukte elektrische und magnetische Felder. Die stärksten Belastungen treten in unmittelbarer Nähe von Unterwerken und Hochspannungsleitungen auf. Je höher die Stromstärke und Spannung und je kleiner der Abstand zu den Strom führenden Anlagen, desto grösser sind diese Felder. Während sich das elektrische Feld bzw. die elektrische Strahlung jedoch relativ gut abschirmen lässt, durchdringt das

magnetische Feld nahezu alle Materialien. In den letzten Jahren hat die Diskussion um unterirdisch verlegte Hochspannungsleitungen (Kabel) deshalb zugenommen, insbesondere in dicht besiedelten Gebieten sowie in wertvollen Landschaften.

Die maximal zulässigen NIS-Werte werden durch die in der NIS-Verordnung festgelegten vorsorglichen Emissionsbegrenzungen für Hochspannungsleitungen begrenzt. Dabei gibt es unterschiedliche Anforderungen für neue, geänderte oder alte Anlagen (BUWAL 2005).

Ausgangslage, Bedeutung der Technologie

Das schweizerische Elektrizitätsnetz bildet das Rückgrat der schweizerischen Stromversorgung. Laut Angaben von Swissgrid wurden im Jahr 2010 gut 80 TWh (gut 130% des gesamten jährlichen Stromverbrauchs) über das Schweizer Übertragungsnetz transportiert. Die übertragene Energiemenge nahm in den letzten Jahren entsprechend der Zunahme des Stromverbrauch sowie der Importe und Exporte laufend zu (typischerweise um rund 2% pro Jahr).

Das Schweizer Stromnetz ist jedoch veraltet, viele Leitungen sind über 40 Jahre alt. Zudem genügt das Netz den heutigen Anforderungen nicht mehr. Zu den dringendsten Erneuerungen und Ausbauten zählen Massnahmen zur Eliminierung von strukturellen Engpässen – auch im Zusammenhang mit dem internationalen Transit –, zur verbesserten Integration der Stromerzeugungsanlagen mit stark fluktuierenden Leistungen auf der Basis erneuerbarer Energien (PV, Wind), zur Verstärkung der bidirektionalen Kommunikation mit Endverbrauchern (Smart Metering) und zur Ermöglichung der kraftwerksseitigen Steuerung lokaler Verbraucher sowie lokaler Speicher (Smart Grids).

Aussichten, Zukünftige Entwicklungspotenziale

Der steigende Energieverbrauch, der geplante Ausstieg aus der Kernenergie, die zunehmend wichtiger werdende Einspeisung aus Stromerzeugungsanlagen auf Basis erneuerbarer Energien sowie die notwendige Verstärkung der Stromeffizienz stellen grosse Herausforderungen an das zukünftige Elektrizitätsnetz der Schweiz. Dabei kann zum einen auf bereits bekannte Technologien gesetzt werden, zum andern wird sich die Erneuerung des Netzes aber auch innovativer, heute noch nicht erprobter, Netztechnologien bedienen müssen (BFE 2011).

Die Notwendigkeit des strategischen Netzausbaus wurde schon vor Jahren erkannt und hat sich durch den Beschluss des Ausstiegs aus der Kernenergie weder in der Dringlichkeit noch der Stossrichtung verändert. Gemäss Hochrechnungen der El-Com sind allein für den Ausbau und die Erneuerung des Höchstspannungsnetzes Investitionen von über 3 Mia. Franken über die nächsten zehn Jahre notwendig. Damit sollen bis 2020 fast 1000 km Leitungen ausgebaut und erneuert werden (Zum Vergleich: in den letzten zehn Jahren konnten nur rund 150 km neue Leitungen realisiert werden.) Bis 2030 muss mit weiteren Investitionen in Milliardenhöhe gerechnet werden (BFE 2011).

Bis heute wurden 52 strategische Netzausbauprojekte definiert (BFE 2011) Ein erster Schwerpunkt ist die Sicherstellung des Netzbetriebs auch bei erhöhten Anforderungen. Die sogenannte „Sicherheitsregel N-1“ kann heute während etwa 15% des Jahres nur mithilfe von Einschränkungen des Handels und der Kraftwerksproduktion eingehalten werden.

Langfristig erhofft man sich viel vom europäischen Super-Grid, ein leistungsfähiges Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungsnetz (HGÜ), das u.a. erlaubt, grössere Energiemengen über lange Distanzen mit sehr viel geringeren Verlusten zu transportieren, als dies durch konventionelle Wechselspannungsnetze möglich ist. Das derzeitige europäische Verbundnetz ist ebenfalls am Rande seiner Kapazität. Ein europäisches HGÜ-Netz würde die Transportkapazität für Strom massiv erweitern. Insbesondere würde dadurch z.B. die Übertragung von Strom aus solarthermisch-elektrischen (CSP-) Anlagen aus Nordafrika sowie der Transport von Strom aus Offshore-Windenergieanlagen von der Nordsee in die Schweiz ermöglicht.

Chancen

Die Schweizer Elektrizitätswirtschaft sieht sich gerne als Stromdrehscheibe Europas. Um ihre derzeit starke Position als solche Stromdrehscheibe nicht zu gefährden, wird sich die Schweizer Elektrizitätswirtschaft mittelfristig voll in den EU-

Strombinnenmarkt integrieren müssen. Ein leistungsfähiges, modernes, den zukünftigen Anforderungen gerecht werdendes Elektrizitätsnetz ist dazu absolute Voraussetzung.

Die verantwortlichen Stellen in der Schweiz haben zudem erkannt, dass der Ausbau und die Erneuerung des Stromnetzes für den Umbau der Stromversorgung von einem System mit wenigen zentralen Grosskraftwerken zu einem Netz mit verstärkt dezentraler Einspeisung aus erneuerbaren Quellen für die Versorgungssicherheit und die bessere Integration der erneuerbaren Energien absolut zentral ist. Swissgrid und die Projektgruppe Strategische Netze analysieren und diskutieren derzeit intensiv, wie das Netz ausgestaltet und umgebaut werden muss, wenn in mittlerer Zukunft der wegfallende Strom aus den KKW durch eine Kombination von Stromerzeugungsanlagen im Inland, verstärkte Stromeffizienz sowie allenfalls Importe ersetzt werden muss. Die Zeit für die entsprechende Realisierung wird knapp, doch da die grossen Schritte des Ausstiegs aus der Kernenergie (Abschaltung der ersten KKW, substanzieller Ausbau der Erneuerbaren) voraussichtlich erst ab anfangs der 2020-er Jahre erfolgen werden, scheint die Umgestaltung des Netzes mit einem ambitionierten Fahrplan machbar zu sein.

Die Führung von Netzen entlang von Infrastrukturanlagen birgt geringe negative Auswirkungen auf die Umwelt.

Risiken

Die Bedeutung und Verletzlichkeit des Elektrizitätsnetzes wird in den kommenden Jahren weiter zunehmen. Der grosse Stolperstein ist, dass das heutige Stromnetz für die zentrale Stromproduktion in grossen Wasser- und Kernkraftwerken konzipiert und gebaut wurde und es damit den Anforderungen der zunehmend dezentralen Stromproduktion aus erneuerbaren und z.T. stark fluktuierenden Quellen nicht gewachsen ist. Das Stromnetz der Zukunft muss sich daher entsprechend den neuen Anforderungen rüsten. Gelingt der Netzausbau nicht innerhalb der noch verbleibenden Zeit bis zur erwarteten, massiv beschleunigten Zunahme der Stromerzeugung auf Basis erneuerbarer Energien (in der Schweiz v.a. PV, voraussichtlich ab Mitte der 2020-er Jahre), dürften die Integration der erneuerbaren Stromproduktionsanlagen in der Schweiz sowie der Transport von erneuerbarem Strom in/durch die Schweiz stark behindert werden.

Handlungsbedarf und Handlungsansätze

Als zentral wird die Weiterführung der Arbeiten der Strategiegruppe Netz 2020 betrachtet. Sie verfolgt das Ziel, das zukünftige Netz, das den neuen Anforderungen entspricht, zeitgerecht zu realisieren.

Dabei ist sicherzustellen, dass diese Projektgruppe sich nicht nur mit energetisch/technischen und wirtschaftlichen Aspekten der Netzerneuerung befasst, sondern dass auch die Umweltwirkungen einzelner Technologien bei der Planung des zukünftigen Netzes soweit möglich berücksichtigt werden (vergl. BFE 2012).

Ebenso wichtig erscheint die Integration des Schweizer Netzes in den EU-Strombinnenmarkt zu sein. Seit Jahren sind Verhandlungen über ein bilaterales Stromabkommen zwischen der EU und der Schweiz im Gange (das im Mai 2010 auf ein Energieabkommen erweitert wurde). Die Unterzeichnung war ursprünglich für Ende 2011 vorgesehen. Aufgrund der Differenzen in der Gesetzgebung, die noch zu bereinigen sind, dürfte sich der Abschluss der Verhandlungen noch etwas verzögern.

Instrumente zur Minimierung der Umweltwirkungen

Planung: Die Planung von Übertragungsleitungen erfolgt im Sachplan Übertragungsleitungen (SÜL). Das Plangenehmigungsverfahren richtet sich nach der Verordnung über das Plangenehmigungsverfahren für elektrische Anlagen.

Vögel: Für den Schutz der Vögel gibt es verschiedene technisch/konstruktive Massnahmen. Dazu zählen z.B. vogelsichere Masten, bei denen mögliche Lande- und Sitzplätze mindestens 60 cm von stromführenden Elementen entfernt sind (BAFU 2009). Da die Stromleiter einen Abstand von mindestens 140 cm zueinander haben, können Vögel weder beim An- noch beim Abflug gleichzeitig zwei Stromleitungen berühren oder einen Erdschluss auslösen.

Bei der Vogelwarte Sempach ist im Auftrag des BAFU eine Konfliktkarte für Brut-

und Gastvögel und eine solche für Zugvögel in Erarbeitung. Diese richtet den Fokus allerdings auf die Gefährdung durch Windkraftanlagen. Eine Ergänzung dieser Karte um Konflikte mit Freileitungen ist zu prüfen

NIS: Das Ziel der vorsorglichen Emissionsbegrenzung ist, die Magnetfeld-Langzeitexposition so weit zu verringern, als dies technisch und betrieblich möglich und wirtschaftlich tragbar ist. Dazu hat der Bundesrat in der NISV für Hochspannungsleitungen den Anlagegrenzwert von 1 μ T festgelegt. Er muss von neuen Anlagen, an sogenannten Orten mit empfindlicher Nutzung (OMEN) und in der Regel bei Volllastbetrieb eingehalten werden.

Weitere Aspekte

Es gibt nicht nur Auswirkungen der Stromversorgungsnetze auf die Umwelt, sondern ebenso signifikante Auswirkungen der Natur auf diese Netze. Dazu zählen (mit Bezug auf das gewählte Umweltkriterienraster) insbesondere Naturgefahren: Extreme Wettersituation können zu Ereignissen (Lawinen, Murgänge, Windböen) führen, welche die Masten der Freileitungen, und allenfalls (v.a. Murgänge) sogar unterirdische Leitungen, nachhaltig beschädigen können.

Literatur

- BAFU 2009**: Vogelschutz an Starkstrom-Freileitungen mit Nennspannungen über 1 kV. Bern.
- BAFU 2011a**: Referat/Beitrag E. Suter zu Schlussbericht des 11. UVP-Workshops von AUE Bern/AFU Solothurn vom 11.11.2011 in Bern
- BAFU 2011b**: Freileitungen. <http://www.bafu.admin.ch/landschaft/00522-/01659/01660/index.html?lang=de>, Zugriff: 9.1.2012].
- BFE 2007**: Schlussbericht der Arbeitsgruppe Leitungen und Versorgungssicherheit. Bern.
- BFE 2011**: Energienetze in der Schweiz. Diverse Artikel zum Thema Strom- und Gasnetz in „energeia“, dem Newsletter von BFE, Ausgabe 5, September 2011, Bern
- BFE 2012**: Überarbeitetes Schema für die Bewertung von Übertragungsleitungen
- BUWAL 2005**: Elektrosmog in der Umwelt. Bern.
- BUWAL 1997**: Landschaftskonzept Schweiz LKS
- EDI 1980**: Elektrizitätsübertragung und Landschaftsschutz. Wegleitung. Bern.
- ESB (Energie Service Biel) 2012**: Heizen mit Erdgas. [<http://www.esb.ch/-produkte/erdgas/heizen-mit-erdgas/> Zugriff: 9.1.2012].
- Swissgrid 2012**: Freileitung. [http://www.swissgrid.ch/swissgrid/de/home/grid-technologies/overhead_line.html, Zugriff: 9.1.2012].

Energiestrategie 2050 – Umweltwirkungen Technologien

Beurteilungsblatt Technologie Nr. 9

Technologietyp: **Gasnetz**
 Version / Datum: Version 3, 31. Oktober 2012
 Verfasser/in: B. Oettli (INFRAS)

Wichtigste Umweltwirkungen

Der Bau und Betrieb von Gasleitungen, Kompressoren und Messstationen kann negative Umweltwirkungen auf Böden, Landschaft und Flächennutzung haben und Störfallrisiken beinhalten:

- Störfall: Gasexplosionen sind sehr selten, können jedoch verheerende lokale Auswirkungen haben.
- Eine Gasleitungstrasse durch den Wald bleibt dauernd wahrnehmbar (Niederhaltung der Bäume) und kann zu einer Beeinträchtigung des Landschaftsbilds führen.
- Der Flächenverbrauch konzentriert sich auf die Phase des Baus der Trassen bzw. der Erdverlegung der Gasleitung. Die Bodenflächen im Bereich der Trassen können jedoch während der Betriebsphase der Gasleitungen landwirtschaftlich zum grössten Teil wieder genutzt werden. Bauliche und andere Nutzungen bleiben zu meist ausgeschlossen.
- Im Erdreich verlegte Gasleitungen können (insbesondere infolge der Eingriffe beim Bau) Böden negativ beeinflussen (z. B. Verdichtung, Beeinträchtigung des Grundwassers).

Wirkung:

- positiv
- negativ
- stark
- schwach

in Phase:

- H: Herstellung
- R: Realisierung, Bau
- B: Betrieb
- S: Stilllegung, Rückbau

	Naturräume, Artenvielfalt			Klima	Schadstoffe, Lärm, NIS			Risiken	
	Biodiversität	Landschaftliche Vielfalt	Flächennutzung	Treibhausgase/ fossile Energie	Schadstoffe	Lärm	Nicht ionisierende Strahlung	Naturgefahren	Störfall
Gas-Netz	R	R, B	R, B			R			(R), B

Beurteilung

Biodiversität

Die Umweltwirkungen von Gasleitungen auf die Biodiversität werden in der Realisierungsphase als schwach negativ, im Betrieb als vernachlässigbar eingestuft.

Im Boden verlegte Gasleitungen haben im Grunde genommen die gleichen Auswirkungen auf die Biodiversität wie alle unterirdischen Leitungen (z.B. Wasser- oder elektrische Leitungen). Problematisch ist insbesondere die Neuverlegung einer Gasleitung durch ökologisch sensible Gebiete, z.B. Schutzgebiete oder Biotope. Die Neuver-

legung oder Veränderung von Gasleitungen ist allerdings nur mit einer Plangenehmigung der Aufsichtsbehörde möglich, sodass das Risiko eines aus Sicht der Umwelt störenden Eingriffs in solche Gebiete als sehr gering betrachtet wird.²¹

Landschaftliche Vielfalt

Die Wirkung von Gasleitungen und von oberirdischen Anlageteilen der Gasversorgung auf die landschaftliche Vielfalt wird als schwach negativ beurteilt.

Für die Durchquerung von Wäldern muss normalerweise eine Schneise geschlagen werden. Da die Bäume aus Sicherheitsgründen niedrig gehalten werden müssen (Einfluss der Baumwurzeln auf die Gasleitung) ist die Wiederanpflanzung von tief wurzelnden, hohen Bäumen daher nicht mehr möglich. Eine Gasleitungstrasse durch den Wald bleibt also grundsätzlich dauerhaft wahrnehmbar und kann zu einer Beeinträchtigung des Landschaftsbilds führen. In Feldern, Wiesen und offenen, weiten Landschaften hingegen ist der Verlauf der Trassen ein paar Jahre nach Beendigung der Bauarbeiten kaum mehr sichtbar, sofern die Rekultivierungsarbeiten mit der nötigen Fachkenntnis und Sorgfalt vorgenommen wurden. Im Gegensatz verbleiben oberirdische Anlageteile der Gasversorgung dauerhaft sichtbar. Sie sind sorgfältig in die Landschaft einzupassen.

Flächennutzung

Die Wirkung von Gasnetzen auf die Flächennutzung und Böden wird als schwach negativ eingestuft.

Der im Betrieb verbleibende Flächenverbrauch von Gasleitungen wird als gering betrachtet. Hingegen ist die Flächenbeanspruchung während der Phase des Baus der Trassen bzw. der Erdverlegung der Gasleitungen beträchtlich. Die Bodenflächen im Bereich der Trassen können jedoch während der Betriebsphase der Gasleitungen zum grossen Teil wieder landwirtschaftlich genutzt werden. Die meisten anderen Nutzungen, namentlich auch die Wiederanpflanzung von tief wurzelnden, hohen Bäumen über Gasleitungen sind jedoch nicht mehr möglich. Der Flächenverbrauch von Kompressor- und Messstationen wird als vernachlässigbar betrachtet.

Boden

Bei der Festlegung der Trassen für die Gasleitungen muss darauf geachtet werden, ökologisch besonders empfindliche Zonen sowie empfindliche Böden so weit als möglich zu umfahren oder in unterirdischen Stollen zu durchqueren. Grosses Gewicht ist auf den Schutz der Böden zu legen. Um die Gasleitungen zu verlegen, werden schwere Baumaschinen benötigt. Böden müssen daher gegen starke Verdichtung geschützt und es darf nur bei idealer Witterung gearbeitet werden. Nach den Arbeiten wird das Land wieder in den ursprünglichen Zustand gebracht.

Treibhausgase

Die Wirkung von Gasnetzen hinsichtlich der Emission von Treibhausgasen wird als sehr gering (vernachlässigbar) beurteilt (vergl. Beurteilung allfälliger Lecks unter Störfall).

Schadstoffemissionen

Die Wirkung von Gasnetzen hinsichtlich Schadstoffemissionen wird als praktisch null beurteilt.

Für die Gasleitungen werden heute ausschliesslich Stahlrohre verwendet. Diese sind zwar von einem PE-(Polyethylen-)Mantel umhüllt; PE hat aber keine Umweltwirkung.

²¹ Gemäss Art. 3 RLG ist die Plangenehmigung u.a. zu verweigern oder, wenn eine mildere Massnahme ausreicht, nur unter einschränkenden Bedingungen oder Auflagen zu erteilen, wenn Bau oder Betrieb der Anlage Personen, Sachen oder wichtige Rechtsgüter gefährden, insbesondere wenn die Gefahr einer Gewässerverunreinigung oder einer wesentlichen Beeinträchtigung des Orts- und Landschaftsbildes besteht.

gen, ausser, dass es nicht abgebaut wird. Ebenso erreicht der Ausstoss von Schadstoffen während der Produktion, der Verlegung oder dem Rückbau der Gasrohre keine nennenswerte Grösse, sofern die gängigen Massnahmen getroffen werden (Partikelfilter bei Baumaschinen, Einhausungen beim Schweißen etc.).

Lärm

In Bezug auf Lärm wird die Wirkung von Gasnetzen aufgrund des Baulärms in der Realisierungsphase als leicht negativ beurteilt.

Störfall

Die Störfallrisiken von Gasleitungen und deren Auswirkungen auf die Umwelt werden als stark negativ beurteilt.

Störfälle können sich aufgrund gravierender technischer Mängel, Unfälle, menschlicher Unachtsamkeit oder bewusster menschlicher Gewaltanwendung ereignen.

Bei der Beurteilung dieser Risiken und potenziellen Wirkungen ist zu beachten, dass der Zustand des Gasnetzes heute in der Schweiz sehr gut überwacht wird. Die Hauptleitungen sind segmentiert und mit automatischen Überwachungssystemen und Schliessorganen ausgerüstet, die allfällige betriebliche Unregelmässigkeiten und Störfälle automatisch sehr rasch erkennen, die Position eines Lecks genau orten und defekte Segmente abschalten können. Das Risiko für grosse Schadensauswirkungen wird dadurch stark eingeschränkt. Dabei ist zwischen a) den Wirkungen auf die eigentliche Umwelt sowie b) den Wirkungen auf Menschen, Tiere und Sachobjekte zu unterscheiden:

a) Wirkungen auf die eigentliche Umwelt

Der direkte Einfluss einer Explosion oder eines Fackelbrandes kann verheerende Auswirkungen auch auf Biotope haben: Bis in einen Umkreis von 200–300 m oder weiter wird alles zerstört (vgl. unten)! Nennenswerte Wirkungen mit direkten und relevante Folgen für Biodiversität, Landschaft, Böden oder Gewässer können sich allerdings praktisch nur dann bemerkbar machen, wenn grosse Mengen an Gasen über relativ lange Zeit in einer Senke liegen bleiben und damit eine „lange Einwirkzeit“ hätten. Das Risiko für verheerende Auswirkungen von Explosionen für die Umwelt wird bei den in der Schweiz vorliegenden Mengen (bzw. der Dimension und der oben erwähnten Sicherheitsmechanismen des Gasnetzes) und Umgebungsbedingungen als gering betrachtet.

b) Wirkungen auf Menschen, Tiere und Sachobjekte

Risiko technischer Mängel: Zuständig für die Sicherheit von Übertragungsleitungen ist das Eidg. Rohrleitungsinspektorat ERI. Regelmässige Kontrollen des Gasnetzes, strenge Verordnungen und technische Richtlinien und die Tatsache, dass sich Erdgas schnell verflüchtigt und eine hohe Entzündungstemperatur von 650° hat, sorgen dafür, dass die Wahrscheinlichkeit von Zwischenfällen in der Schweiz als sehr gering eingestuft wird (ESB 2012). Gasexplosionen sind jedoch möglich und können im schlimmsten Fall verheerende Auswirkungen haben (siehe unten).

Unfälle: Unfälle können sich sowohl entlang der Gasleitung oder bei Bezug bzw. Nutzung des Gases ereignen (letztere sind für die Betrachtungen im Rahmen dieses Beurteilungsblatts nicht relevant). Typische Beispiele sind die unbeabsichtigte Zerstörung einer Gasleitung durch Bagger im Zuge von Bauarbeiten oder Defekte und betriebliche Störungen/Unfälle (Lecks oder Explosionen) an den oberirdischen Anlageteilen der Gasversorgung.

In der Schweiz gibt es im Zusammenhang mit Gasleitungen jährlich in der Grössenordnung von 10 bis 20 Unfälle mit erheblichen Sach- oder gar Personenschäden. Der SVGW (Schweizerische Verein des Gas- und Wasserfachs; Fach- und Netzwerkorganisation der Branche) führt und publiziert dazu jährlich eine Gasstatistik. Es werden auch alle Ereignisse an/mit Gasleitungen erfasst, bei denen eine grössere Menge Erdgas unkontrolliert ausgetreten ist oder hätte austreten können (inkl. Beinaheunfälle),

soweit diese dem SVGW gemeldet werden. Für Unfälle mit Sachschäden oder Todesfolge ist eine Meldung zwingend (SVGW 2012).

Risiko Sabotage/Terroranschläge: In südlichen und östlichen Ländern sind Gasleitungen oft das Ziel von Sabotageakten und Diebstahl von Gas. Versuche, die Gasleitungen mit Gewalt zu öffnen und anzuzapfen, enden meist in Katastrophen mit Dutzenden von Toten. Die Liste der Gasleitungsunfälle und -desaster im Ausland mit Personenschäden ist sehr lang. In der Schweiz ist aus den letzten zehn Jahren kein solcher Fall bekannt, das Risiko für Gewaltanwendungen an Gasleitungen wird als sehr gering eingeschätzt.

Umweltwirkungen und Unfallrisiken im Vergleich zu anderen Energiesystemen (Energy Chains):

Im Vergleich zu fossilen Energiesystemen (inkl. Zuführung der Energieträger an den Ort des Verbrauchs) haben gasbasierte Systeme sowie in Bezug auf die Wirkungen von Unfällen auf die eigentliche Umwelt wie auch in Bezug auf Risiken und Schäden für Mensch, Tier und Sachobjekte die geringste Bedeutung. Die Wirkungen infolge von Unfällen bei kohle- und ölbasierten Systemen werden als deutlich höher eingestuft. Im Vergleich mit den Umweltwirkungen und Unfallrisiken von Wasserkraftwerken oder Kernkraftwerken werden diejenigen von gasbasierten Energiesystemen hingegen als klar höher beurteilt (PSI 2005).

Ausgangslage, Bedeutung der Technologie

Erdgas ist mit einem Anteil von 12% am Energieverbrauch der Schweiz ein bedeutender, wenn auch im europäischen Vergleich unterdurchschnittlich genutzter, Energieträger (nur rund 0.7% des insgesamt in Europa verbrauchten Erdgases entfallen auf die Schweiz). Da kaum abbauwürdige einheimische Vorkommen vorhanden sind, wird der Bedarf von rund 30 TWh pro Jahr zu 100 Prozent durch Importe gedeckt. Die Schweiz bezieht den weitaus grössten Teil (ca. 75%) ihres Gasbedarfs aus Fördergebieten innerhalb der EU und Norwegen. Die Erdgasversorgung der Schweiz erfolgt über das europäische Hochdruck-Pipeline-Netz, welches sich gegenwärtig über eine Rohrlänge von rund 190'000 km vom Atlantik bis nach Sibirien erstreckt (UVEK 2012). Die nationale Gasinfrastruktur besteht im Wesentlichen aus dem Hochdruck-Transportnetz von rund 2'277 km Rohrlänge einschliesslich dazugehöriger Nebenanlagen (Kompressoren, Messstationen etc.), welches über elf Anschlussstellen mit dem europäischen Hochdruck-Pipeline-Netz verbunden ist. Das Rückgrat der Schweizer Gasinfrastruktur bildet die 1974 in Betrieb genommene Nord-Süd-Transitleitung von Wallbach (AG) zum Griespass (VS), über die rund drei Viertel des Landesverbrauchs eingeführt werden. Der Import der restlichen Mengen erfolgt über verschiedene grenzüberschreitende Anschlusspunkte der regionalen Hochdrucknetze (UVEK 2012).

Aussichten, Zukünftige Entwicklungspotenziale

Anders als das Elektrizitätsnetz ist das Gasnetz inkl. Nebenanlagen schon heute für die Zukunft gerüstet, da der letzte Ausbau erst einige Jahre her ist. Zwischen 1993 und 2005 wurden die Transitgasleitungen zwecks Erhöhung der Transportkapazitäten erweitert (Vergrösserungen Durchmesser, parallele Leitungen, komplett neue Abschnitte). Weitere substantielle Ausbauten sind auch im Hinblick auf die neue Schweizer Energiepolitik mit dem Ausstieg aus der Kernenergie nicht geplant, da die Netze gut dimensioniert und auch für den in Zukunft steigenden Erdgasverbrauch gerüstet sind. Wie sich der Erdgasverbrauch in Zukunft entwickeln wird, ist davon abhängig, ob und in welcher Menge Gas zur Stromproduktion eingesetzt wird. Gemäss Swissgas AG reichen die Netzkapazitäten im Hochdruckbereich aus, um drei bis fünf grosse Gaskombikraftwerke zu betreiben (BFE 2011).

Chancen

Die energetische Nutzung von Gas (als fossiler Brenn- und Treibstoff) wird als Übergangstechnologie betrachtet. Einer der wesentlichen Vorteile von Erdgas ist, dass es Seite an Seite mit anderen Energiequellen (v.a. erneuerbaren Energien) sehr flexibel in der Stromerzeugung genutzt werden kann. Es wird davon ausgegangen, dass Gas und damit das Gasnetz für die Stromerzeugung zumindest in einer Übergangsphase

(ca. 2030–2050, in der die erneuerbaren Energien und die verstärkte Energieeffizienz die Abschaltung der Kernkraftwerke noch nicht zu kompensieren vermögen) eine wichtige Rolle spielen wird.

Risiken

Die Gasreserven in Norwegen und der EU sind beschränkt. Im Zuge des deutschen Ausstiegs aus der Kernenergie sowie des weiterhin steigenden Energiebedarfs ist davon auszugehen, dass die Gesamtnachfrage Westeuropas deutlich zunehmen wird. Der westeuropäische Gasmarkt könnte daher in Zukunft zunehmend von Russland abhängig werden. Aufgrund der kürzeren Transportwege wird angenommen, dass Russland als Lieferant klare Standortvorteile gegenüber den alternativen Gaslieferanten aus Zentralasien hat. Damit könnte z.B. Gazprom Liefermengen und -preise praktisch diktieren. Die Schweiz sollte daher sicherstellen, dass auch sie Zugang zu alternativen Gasquellen in der Türkei und nordafrikanischen Staaten via den zukünftigen Pipelines hat, deren Erstellung in den kommenden fünf Jahren zur besseren Versorgung der EU geplant ist. Ob als weitere Alternative die Anbindung der zentralasiatischen Gasreserven (in Aserbaidschan und Kasachstan) gelingen kann, erscheint zurzeit noch als sehr fragwürdig (Hobohm 2008).

Wie für alle anderen umfangreichen Infrastrukturprojekte sehen sich heute auch praktisch alle Projekte zur Erweiterung des Gasnetzes oder des Ersatzes von Gasleitungen mit vielen Einsparungen konfrontiert. Diese können die Realisierung von Bauvorhaben erheblich verzögern.

Handlungsbedarf/ Handlungsansätze

Der schweizerische Gesetzgeber hat den Netzzugang vor vierzig Jahren nur sehr pauschal und rudimentär im Rohrleitungsgesetz verankert und seither mangels Bedürfnis auf eine spezifischere Gesetzgebung verzichtet.

In der kleinräumigen Schweiz wird es immer schwieriger, Korridore für neue Trassen von Gasleitungen zu finden. In naher Zukunft sollten die rechtlichen Voraussetzungen geschaffen werden, um vorausschauend geeignete Gebiete für Infrastrukturkorridore zu sichern, und diese damit insbesondere für die Planung und den Bau von ausreichend dimensionierten Gasleitungen freizuhalten zu können. Durch die Korridorsicherung sollte zudem verhindert werden können, dass eine Gasleitung verschoben werden muss, weil die Bauzone zu nah an die bestehende Leitung heran vergrössert worden ist (was heutzutage in der Schweiz immer wieder vorkommt).

Obwohl das Gasnetz gemäss Ansicht der Swissgas AG auch im Hinblick auf den geplanten Ausstieg aus der Kernenergie gerüstet ist (vergl. Aussichten), sollten die Anforderungen der zukünftigen Energieversorgung der Schweiz an das Gasnetz (inkl. Nebenanlagen) von Unabhängigen in naher Zukunft genau analysiert und die Strategie und Ausbaupläne überprüft werden. Falls nötig, sind diese aufgrund der seit 2011 grundlegend neuen Situation anzupassen.

Instrumente zur Minimierung der Umweltwirkungen

Bau und Betrieb von Übertragungsleitungen für Elektrizität und Gas sind im Elektrizitäts- und im Rohrleitungsgesetz (RLG) des Bundes geregelt.

Gasleitungen, die nicht dem eidgenössischen Rohrleitungsgesetz unterstehen (in erster Linie solche mit maximal 5 bar Betriebsdruck), werden durch die Kantone bewilligt.

Bauphase: Das BFE hat in Absprache mit dem BAFU 1997 „Richtlinien zum Schutze des Bodens beim Bau unterirdisch verlegter Rohrleitungen“ publiziert (BFE 1997).

Was den Schutz der Landschaft betrifft, hat sich z.B. die Praxis eingespielt, Waldschneisen im Zickzack zu realisieren, damit der Eingriff weniger gut sichtbar bleibt.

Weitere Aspekte

Es gibt nicht nur Auswirkungen des Gasnetzes auf die Umwelt, sondern ebenso signifikante Auswirkungen der Natur auf das Gasnetz. Dazu zählen (mit Bezug auf das gewählte Umweltkriterienraster) insbesondere Naturgefahren: Extreme Wettersituationen können zu Ereignissen (Lawinen, Murgänge) führen, welche die unterirdischen Leitungen freilegen und beschädigen können (so geschehen im Sommer 2010: Beschädigung der Transitgasleitung zwischen Nord- und Südeuropa, Gastransport nach Italien bis Dezember 2010 aus Sicherheitsgründen unterbrochen) (BFE 2011).

Literatur

- BFE 1997:** Richtlinien zum Schutze des Bodens beim Bau unterirdisch verlegter Rohrleitungen
(http://www.bfe.admin.ch/energie/00567/00568/00602/index.html?lang=de&dossier_id=00874)
- BFE 2011:** Energienetze in der Schweiz. Aussage R. Rohrbach, CEO Swissga AG, gemäss Artikel zum Thema Gasnetz in „energeia“, dem Newsletter von BFE, Ausgabe 5, September 2011, Bern
- Erdgas 2012:** <http://www.erdgas.ch>
- ESB (Energie Service Biel) 2012:** Heizen mit Erdgas.
<http://www.esb.ch/produkte/erdgas/heizen-mit-erdgas/> Zugriff: 9.1.2012
- Hobohm Jens 2008:** Mehr Erdgas für den Klimaschutz? Chancen und Risiken einer erweiterten Gasstrategie für die europäische Energieversorgung. Studie SWP (Stiftung Wissenschaft und Politik), November 2008, Berlin
- PSI 2005:** Comparative Assessment of Natural Gas Accident Risks.
http://gabe.web.psi.ch/pdfs/PSI_Report/SVGW_PSI-Bericht-05-01.pdf
- UVEK 2012:** Gasnetz Schweiz.
<http://www.uvek.admin.ch/infrastrukturstrategie/02570/02597/02602/index.html?lang=de>
- SVGW 2012:** Schweizerischer Verein des Gas- und Wasserfachs, Gasstatistik.
<http://www.svgw.ch/index.php?id=111>