

1 Grundlagen der Umweltschutztechnik

Umweltschutztechnik verbindet die Herstellung und Verwendung von Nutzgegenständen mit dem Schutz natürlicher Ressourcen – das sind sowohl die materiellen Komponenten wie Wasser, Luft und Boden als auch ideelle Werte wie bspw. das Wohnumfeld. Ziel und Aufgabe in Forschung und Praxis sind die Vermeidung von unerwünschten Nebenwirkungen für die Umwelt bei Ingenieurlösungen.

Der ökologische Technikansatz ist dem *Vorsorgeprinzip* verpflichtet, der frühzeitigen Erfassung möglicher negativer Effekte. Er folgt dem *Leitbild der Nachhaltigkeit*, das den Einklang von wirtschaftlicher Entwicklung, sozialer Sicherheit und der langfristigen Erhaltung der natürlichen Lebensgrundlagen anstrebt.

Abschnitt 1.1 befasst sich mit der Umsetzung dieses Leitbildes, u. a. bei den globalen Klimaschutzziele; die Abschn. 1.2 und 1.3 beschreiben die ökologischen und technologischen Grundlagen der Querschnittsdisziplin Umweltschutztechnik mit Beispielen aus den einzelnen Schwerpunktbereichen. Themen in Abschn. 1.1 sind u. a.: traditionelle und moderne Umweltprobleme – Technikbilder und Umwelthandeln – Nachhaltigkeit in Wirtschaft (Gastbeitrag Holger Rogall, S. 8–12), Politik, Recht und Verwaltung – Bilanzen, Modelle, Indikatoren – strategische Handlungsfelder im Umweltschutz – Klimaschutz: Sicherheitsrisiken, Langzeitprognosen, Forschung und Gesetzgebung.

1.1 Entwicklung der Ziele und Aufgaben

Umweltschutztechnik umfasst in einem erweiterten Rahmen die Bestandsaufnahme und Bewertung einer Problemsituation, die Planung und Durchführung technischer Maßnahmen zur Problemlösung, sowie deren Überwachung und Nachsorge. Der Begriff „Umwelttechnik“ wird häufig für die zentralen Ingenieuraufgaben bei der Begrenzung und Reparatur von Umweltschäden benutzt. Die Entwicklung der Umweltschutz- bzw. Umwelttechnik weist bereits mehrere „Etappen“ auf:

1. Als in den 60er Jahren die negativen Begleitumstände einer rasch steigenden Industrieproduktion offensichtlich wurden, kam zunächst die „Nachbesserungs-Philosophie“ mit ihren sog. „End-of-the-pipe-Technologien“ zum Zuge. Bei der nach Branchen, Anlagen und Umweltmedien aufgesplitteten Planung und Anwendung von Techniken wurden jedoch Probleme häufig nur verlagert.
2. Diese Erfahrungen führten zu der Forderung, dass die industriellen Verfahren selbst unter Umweltsichtspunkten optimiert werden sollten.
3. Je weiter die Belastungen aus dem Produktionsprozess verringert wurden, desto deutlicher wurde, dass die Produkte selbst bei ihrer Weiterverarbeitung, bei ihrem Gebrauch und schließlich mit ihrem Endverbleib zu einer Belastung natürlicher Systeme beitragen können.
4. Ausgelöst durch die Klimadiskussion orientieren sich technische Entwicklungen verstärkt an übergreifenden Zielen und Aufgaben: „Think globally, act locally“.

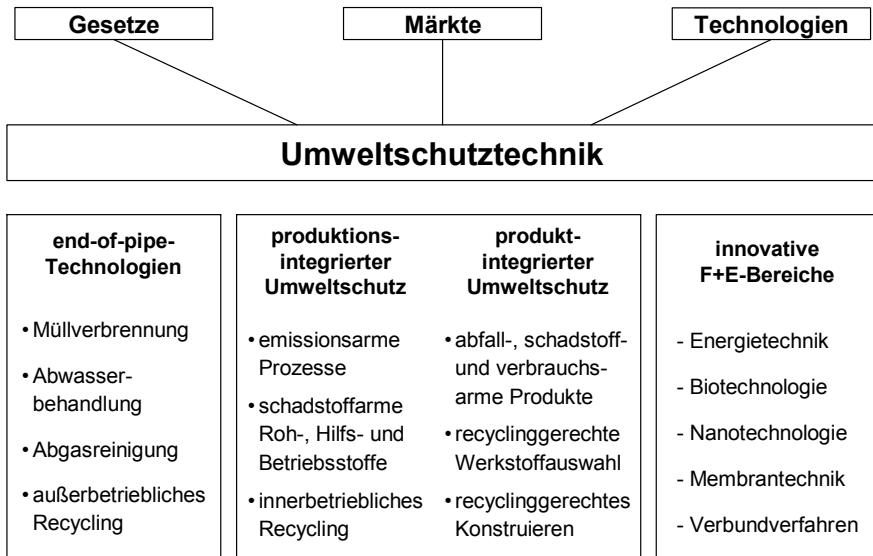


Abb. 1.1 Entwicklungsstadien der Umweltschutztechnik (nach Kaiser [1.1])

In Abb. 1.1 ist die Entwicklung von den nachbessernden zu den integrierten Umweltschutztechnologien im Überblick dargestellt:

- Für den Einsatz von Umwelttechnik sind neben dem technischen Entwicklungsstand die Marktsituation und die gesetzlichen Regelungen maßgebend (Kap. 2); letzteres gilt vor allem für die nachgeschaltete Reinigung von Abgas und Abwasser. *End-of-the-pipe*-Methoden können durchaus fortschrittlich sein, wie das Beispiel der Aktivkohlsfiltertechnik zeigt, deren hoher Wirkungsgrad den Einsatz von Müllverbrennungsanlagen in Stadtgebieten akzeptabel gemacht hat.
- Der *produktionsintegrierte Umweltschutz* zielt auf die Vermeidung und Verminderung von Abfällen innerhalb eines Produktionsprozesses, die Verwertung von Abfällen und Energien in anderen Bereichen des eigenen Betriebes und eine recyclinggerechte Auswahl von Materialien und Verfahren zur Vermeidung von nichtverwertbaren Produktionsabfällen.
- Der *produktintegrierte Umweltschutz* erweitert die verfahrensternen Maßnahmen auf den gesamten Lebensweg eines Produktes. Nachhaltigkeitsziele orientieren sich an der Einsparung von Energie und Materialien, an der Vermeidung von Schadstoffemissionen und an einem recyclingfreundlichen Produktdesign. Nach den klassischen Problemlösungen für gasförmig/flüssig/fest-Emissionen umfasst die zweite und dritte Generation von Umwelttechnologien die Nutzung von Produkten, inklusive deren Transport, Lagerung und Verteilung und am Ende die Ablagerung von Produkten und Nebenprodukten.

In allen drei Bereichen – nachbessernd, verfahrenstern und produktintegriert – werden die technischen Potenziale weiterentwickelt, auch unter Verwendung von *Innovationen* aus benachbarten Disziplinen (Abb. 1.1, rechte Säule).

Die zu lösenden Umweltprobleme befinden sich aus der Sicht der Forschung in ganz unterschiedlichen *Entwicklungsstadien*. Das erklärt auch die teilweise sehr beträchtliche Diskrepanz zwischen den öffentlichen Erwartungen oder gar Ansprüchen auf rasche Problemlösungen und den realistischen Möglichkeiten der Forschung und Praxis. Nach den Einteilungsprinzipien eines frühen niederländischen Umweltprogramms [1.2] werden in Tabelle 1.1 vier Phasen unterschieden, die mit typischen Vorgehensweisen in der Forschung und Praxis verbunden sind:

Ein Beispiel für die *Erkenntnisphase* ist der Treibhauseffekt, bei dem über eine Reihe potenzieller Ursachen, deren interne Vernetzungen und über das Ausmaß der regionalen Auswirkungen bislang weitgehende Unklarheit herrscht. Bei den Schadstoffen im Wasser besteht u. a. Unsicherheit über die Rolle von hormonaktiven Substanzen, die aus human- und tiermedizinischen Anwendungen eingetragen werden. In der *Erfassungsphase* befinden sich nach wie vor eine große Zahl von Pflanzenschutz- und Schädlingsbekämpfungsmittel, die – ebenso wie Nitrat – vor allem Probleme für die Trinkwasserversorgung darstellen. Komplexe Systeme mit vielschichtigen Wechselwirkungen sind bei den neuartigen Waldschäden („Waldsterben“) und bei der Versauerung von Böden zu erfassen. Ein typisches Beispiel für die *Handlungsphase* ist die biologische Sanierung von Altlasten, an dem sich aber auch zeigen lässt, dass die Forderung nach raschen Maßnahmen oft zu ökonomisch und technisch unbefriedigenden Ergebnissen führt, und man besser daran getan hätte, den Aufwand für wissenschaftliche Voruntersuchungen zu erhöhen. Überwiegend in der *Nachsorgephase* befinden die meisten Gewässer, die früher vor allem durch Bakterien und Viren für Menschen gefährlich waren. Gänzlich ohne Nachsorge soll die Deponierung von inertisiertem Restabfall in „Endlagerqualität“ auskommen und so die Reaktordeponie mit ihren langfristig unabsehbaren Auswirkungen („chemische Zeitbomben“) und Folgekosten ablösen.

Tabelle 1.1 Behandlung von Umweltproblemen durch Forschung und Praxis (nach [1.2])

<i>Erkennen</i>	<i>Erfassen</i>	<i>Handeln</i>	<i>Nachsorgen</i>
Entwicklungen deuten sich in Messungen an	Einzelfragen und mögliche Lösungen werden erforscht	Detailplanungen werden durch Praktiker umgesetzt	Problemlösungen werden langfristig überwacht
Treibhauseffekt	Waldsterben	Altlastensanierung	Gewässerschutz
Arzneimittelreste u. hormonaktive Stoffe	PSBM und Nitrat in Grundwässern	Phosphat in Binnen- u. Küstengewässern	Gefährdung durch Bakterien und Viren
Elektromagn. Feld: „Elektro-Smog“	Endlagerung von Nuklearabfällen	Zwischenlagerung von Nuklearabfällen	Anwendung von Röntgen-Strahlung
Verzögerte, nicht-lineare Wirkungen: Zeitbombeneffekte	Deponierung von Industriemüll, Klär- und Baggerschlämme	Müllentsorgung, konventionelle „Reaktordeponie“	Ablagerung von Inert-/Restabfall: „Endlagerqualität“
<i>Grundlagenforschung</i>	<i>angewandte Forschung</i>	<i>praxisbegleitende Forschung</i>	<i>Standardisierung und Normung</i>

1.1.1 Umweltprobleme und Umwelthandeln

In einer historischen Standortbestimmung hat Sieferle [1.3] die folgenden quantitativen und qualitativen Unterschiede zwischen den traditionellen und den modernen Umweltzerstörungen beschrieben:

- An die Stelle punktueller treten *universelle Probleme*. Vor- und frühindustrielle Umweltschäden blieben lokal oder regional, auf die Umgebung einer Stadt oder einer Fabrik beschränkt, während weite Bereiche des betreffenden Ökosystems nicht beeinträchtigt wurden. Bspw. erzeugte erst die völlige Mechanisierung und Chemisierung der Landwirtschaft flächendeckende Umweltschäden.
- An die Stelle einfacher treten *komplexe Wirkungen*. So sind etwa die modernen Waldschäden nicht mehr auf die Wirkung eines bestimmten Stoffes zurückzuführen, sondern auf vielfache „Synergismen“, so dass weder ein „Verursacher“ noch auch eine „Ursache“ eindeutig identifiziert werden kann.
- An die Stelle sofort sinnlich wahrnehmbarer Probleme treten Auswirkungen, die nur mit Hilfe *wissenschaftlicher Analysemethoden* festgestellt werden können. Heute bilden nicht wahrnehmbare Gase, Schwermetalle, giftige organische Verbindungen oder radioaktive Strahlen die Hauptprobleme.
- An die Stelle reversibler treten tendenziell *irreversible Schädigungen*. Die Anreicherung der Böden mit Schwermetallen ist ebenso wenig umkehrbar wie die Veränderung der chemischen Zusammensetzung der Atmosphäre mit ihren unabhsehbaren Konsequenzen für das Klima.

Der Grundtenor der frühen geisteswissenschaftlichen Debattenbeiträge stimmte darin überein, dass die Wurzeln der modernen Umweltprobleme an der Schnittstelle zwischen Technik und Natur zu suchen wären [1.4]. Gegensätzlich entwickelten sich jedoch die Reaktionen auf eine solche „unzulängliche ökologische Einbettung der Technik“: Der *naturalistische* Ansatz enthielt vor allem die Forderung nach einer weitergehenden „moralischen Pflicht gegenüber der Natur“ [1.5]; der *kulturalistische* Ansatz betrachtete dagegen die „Maße für die Umwelt“, z. B. Umweltstandards, als soziale Konventionen [1.6].

Da sich bisher kein eigenständiges *gesellschaftliches Subsystem* „Ökologie“ ausdifferenzieren konnte (vermutlich weil die mit der Ökologie verbundenen Interferenzen zu bestehenden Funktionssystemen wie z. B. Politik, Wissenschaft, Religion usw. zu groß sind), müssen auch in Zukunft ökologische Fragen dezentral gelöst werden, d. h. im Rechtssystem als Rechtsfragen, etwa unter dem Aspekt des Raumrechts, im ökonomischen System über die Marktgesetze, usw. [1.7].

Nach den moralisierenden Schuldzuweisungen der frühen Umweltdiskussion – ökonomisches Fehlverhalten oder unzureichendes Verantwortungsgefühl – wurden in den 90er Jahren zunehmend praxisnähere Ökologieprobleme, z. B. im betrieblichen Umweltschutz, aufgegriffen. Auch bei der Wiederherstellung von geschädigten Umweltbereichen hat sich eine pragmatischere Haltung durchgesetzt („für eine wachsende Zahl von Umweltschützern ist die Technik ein Mittel zum Zweck des Umweltschutzes geworden“) und es gibt keinen Widerspruch zu der Forderung, „dass sich die Technologiepolitik auf die Technologien des ‚Jahrhunderts der Umwelt‘ konzentrieren muss“ ([1.8] siehe *Kasten*).

„Die Technologiepolitik muss sich auf die Technologien des ‚Jahrhunderts der Umwelt‘ konzentrieren“ (E.U. v. Weizsäcker)

Wenn der Zwang zu einem neuen umwelt- und ressourcenschonenden Wohlstandsmodell zur beherrschenden Rahmenbedingung für die Technologieentwicklung wird, steht uns eine Transformation der Technologie bevor, die noch wesentlich tiefer geht als das, was wir in den ersten 30 Jahren „Umwelttechnik“ erlebt haben. Ernst Ulrich v. Weizsäcker hat sieben Kriterien für diesen Technikwandel aufgestellt [1.8]:

- 1) *Sauberkeit*: Im wesentlichen werden nur noch emissionsfreie oder emissionsarme Technologien eingesetzt. Die Emissionsvermeidung wird durch Ausmustern von emissionsträchtigen Techniken, nur im Ausnahmefall durch Emissionsrückhaltung am Ende des Prozesses erreicht.
- 2) *Rohstoffeffizienz*: Der Verbrauch nicht erneuerbarer Rohstoffe wird auf ein Minimum reduziert. Das Verbrennen fossiler Kohlenwasserstoffe wird sehr stark zurückgedrängt und in den hochentwickelten Ländern schließlich völlig eingestellt. Metalle werden weitgehend rezykliert. Langlebigkeit von Produkten sowie bequeme Rohstoffrückführung nach Gebrauch werden selbstverständliche Prinzipien im Produktdesign.
- 3) *Energieproduktivität*: Maschinen, Raumheizung, Beleuchtung, Transport und Verteilersysteme werden auf höchste Energieeffizienz bzw. Energieproduktivität getrimmt; die verengte Verwendung des Begriffes Produktivität auf die Arbeitsproduktivität wird aufgehoben. Fortschritte bei der Energie- oder Rohstoffproduktivität werden allgemein als viel bedeutungsvoller für den Fortschritt angesehen als weitere Arbeitsproduktivitätsgewinne.
- 4) *Ökologische Flächennutzung*: Landwirtschaft, Siedlungen, Industrie und Verkehrswege werden nach dem Gesichtspunkt minimaler Versiegelung, Boden-erosion und Gewässerbelastung umgestaltet, und große Teile des Landes werden vorrangig dem Erhalt ökologisch wertvoller Funktionen gewidmet.
- 5) *Hohe Informationsintensität*: Produkte, Dienstleistungen, Produktions- und Konsumprozesse nehmen relativ an Informationsintensität zu. Wissenschaft und Technik, Datensysteme und Kundeninformation, sprachliche und kulturelle Übersetzungsleistungen belasten die Umwelt wenig und liefern doch Komfort und Freiheit.
- 6) *Fehlerfreundlichkeit*: Politik und Technologie müssen hohes Augenmerk auf Fehlerbegrenzung legen. Da völlige Fehlervermeidung utopisch ist, muss das Konstruktions- und Nutzungsprinzip der Technik die „Fehlerfreundlichkeit“ sein – eine entscheidende Voraussetzung der Evolutionsfähigkeit.
- 7) *Eignung für Eigenarbeit*: Da die Bedürfnisbefriedigung durch Konsum von kurzlebigen, weither transportierten, ressourcenverschlingenden Waren abnehmen muss, wird das Bedürfnis nach befriedigenden und nutzbringenden Tätigkeiten jenseits der formalisierten Erwerbswelt, d. h. nach befriedigender Eigenarbeit zunehmen.

Die Gründe für die Probleme bei der ökologischer Durchdringung der naturwissenschaftlich-technischen Disziplinen liegen auch in den traditionellen „Welt- und Technikbildern“ [1.9] und insbesondere in dem Begriff „Umweltschutztechnik“ treffen zwei grundsätzlich verschiedene Orientierungen und Ausprägungen in allen Lebensbereichen (Naturbild, Bild der Wissenschaftsgesellschaft, Sozialbild, Menschenbild) hart aufeinander¹. Dabei erweist sich die Vorstellung, Technik- und Umweltfragen auf rein natur- und ingenieurwissenschaftlicher Grundlage beantworten zu können, zunehmend als technokratische Illusion. Streitigkeiten etwa um Grenzwerte sind „vernünftig“ nur entscheidbar bei Kenntnis der soziokulturellen Dimension des Problems und einer bewussten Auseinandersetzung mit den Weltbildern, d. h. mit grundsätzlichen Sinn- und Orientierungsfragen².

Aus dieser Bipolarität der persönlichen Welt- und Technikbilder, die sich auch im Akzeptanzverhalten und in der Umweltpolitik manifestiert, entstanden unterschiedliche Strategien des *Umwelthandelns* [1.10]:

- Die *Suffizienz-Strategie* – sei es als „voluntary simplicity“ der Vernunftliebenden und Empfindsamen („Living poor with style“), sei es als autoritäre Zwangsbewirtschaftung in einer Ökodiktatur – ist unrealistisch wegen des weltweiten Vormarsches des Nützlichkeitsdenkens und Glückseligkeitsstrebens, unerwünscht wegen der gewaltsamen Zerstörung freiheitlich-rechtstaatlicher und ziviler Lebensbedingungen, und unwirksam, weil sie implizieren würde, die Weltbevölkerung auf vorindustrielle Ausmaße zurückzuholen.
- Die *Effizienz-Strategie* zielt darauf ab, betriebliche Wirtschaftlichkeitsprinzipien noch konsequenter auch auf ökologische Zusammenhänge anzuwenden. Stoffe sollen möglichst lange immer wieder genutzt werden, ehe sie als Abfall wieder im Naturkreislauf für menschliche Zwecke verloren gehen. Neubekehrte Industrielle neigen dazu, „Nachhaltigkeit“ mit „Effizienz“ weitgehend gleichzusetzen. Bei ökologisch unangepassten bzw. unverträglichen Stoffströmen gelten aber letztlich die gleichen Restriktionen wie für die Suffizienz-Strategie.
- Die *Konsistenz-Strategie* will verhindern, dass sich anthropogene und geogene Stoffströme einander stören oder symbiotisch-synergetisch verstärken. Konsistente Stoffströme sind also solche, die entweder weitgehend störsicher im abgeschlossenen technischen Eigenkreislauf geführt werden, oder aber mit den Stoffwechselprozessen der umgebenden Natur so weit übereinstimmen, dass sie sich, auch in großen Volumina, relativ problemlos darin einfügen. Die Strategie der Konsistenz deckt sich mit den Zielen und Prinzipien des *vorsorgenden integrierten Umweltschutzes*. Je mehr erneuerbare Ressourcen zugleich in naturintegrierten umweltverträglichen Kreisläufen bewirtschaftet werden, um so mehr kann das nackte Effizienz-Handeln wieder in den Hintergrund treten, zumindest aus ökologischer Sicht [1.10].

¹ In der Definition von Huber [1.9] sind dies „eutope“ und „dystope“ Technikbilder. „Eutop“ aus eudämonistisch-utilitaristischer (Glückseligkeits-/Nützlichkeitsphilosophie) Utopie; „dystop“ aus negativer Utopie von der Art „1984“ oder „Schöne Neue Welt“.

² Die Auflagen 1–5 (1990–95) dieses Buchs enthalten Literaturhinweise zur Umweltethik, Umweltpolitik und zum Umweltrecht sowie zu den Debatten über Technik und Umwelt.

1.1.2 Umsetzung des Leitbildes „Nachhaltigkeit“

Die Leitbilder und Konzepte im ökologisch-technischen Umweltschutz gründen sich auf politischen und wirtschaftlichen Vorstellungen und Prinzipien, die sich ihrerseits in den vergangenen Jahren weiterentwickelt haben. War es zunächst der Grundsatz „der Verschmutzer zahlt“, mit dem die Verantwortlichen für offensichtliche Fehlentwicklungen vorrangig vom *Staat* zur Rechenschaft gezogen werden sollten, so setzte man seit Ende der achtziger Jahren nach der knappen und einprägsamen Formulierung Ernst Ulrich v. Weizsäckers [1.8] „Die Preise müssen die ökologische Wahrheit sagen“ auf die *wirtschaftliche Eigendynamik* („Der Markt als grüner Zuchtmeister“). Die Lösung komplexer Umweltprobleme erfordert jedoch auch die Berücksichtigung *sozialer Aspekte*. Über die Vorsorge- und Kooperationsprinzipien entwickelte sich aus dem Brundtland-Report (1987 [1.11]) „Our Common Future“ das Leitbild einer „langfristig naturverträglichen Entwicklung“.

„Sustainable Development“ in der Agenda 21 der UN Umweltkonferenz von Rio de Janeiro von 1992 ist definiert als „dauerhafte Entwicklung, die den Bedürfnissen der heutigen Generation entspricht, ohne die Möglichkeiten künftiger Generationen zu gefährden, ihre eigenen Bedürfnisse zu befriedigen und ihren Lebensstil zu wählen“ [1.12]. Nachhaltigkeitsstrategien wurden auf allen Ebenen weiterentwickelt, z. B. in der Definition der Lokalen Agenda 21 Berlin von 2006 [1.13]: „eine nachhaltige Entwicklung strebt für alle heute lebenden Menschen und künftigen Generationen hohe ökologische, ökonomische und sozial-kulturelle Standards *in den Grenzen der natürlichen Tragfähigkeit* an; sie will somit das intra- und intergenerative Gerechtigkeitsprinzip umsetzen“. Hiernach ist es bei besonders wichtigen natürlichen Lebensgrundlagen, wie einem stabilen Klima oder der Existenz der lebensschützenden Ozonschicht, unsinnig das Erhaltungsinteresse auf Grundlage einer Abwägung aus Kostengründen hinaanzustellen (wobei natürlich weiterhin geprüft werden muss, mit welchen Maßnahmen Klimaschutz und Ozonschicht am kostengünstigsten zu erreichen ist [1.14]). Als solche „ökologischen Leitplanken“ hat die Enquêtekommision des Deutschen Bundestages „Schutz des Menschen und der Umwelt“ vier grundlegende Regeln formuliert [1.15, 1.16]:

1. Die Abbaurate erneuerbarer Ressourcen soll deren *Regenerationsraten* nicht überschreiten. Dies entspricht der Forderung nach Aufrechterhaltung der ökologischen Leistungsfähigkeit, d. h. (mindestens) nach der Erhaltung des von den Funktionen her definierten ökologischen Realkapitals.
2. Nicht erneuerbare Ressourcen sollen nur in dem Umfang genutzt werden, in dem ein physisch und funktionell *gleichwertiger Ersatz* in Form erneuerbarer Ressourcen oder höherer Produktivität der erneuerbaren sowie der nicht erneuerbaren Ressourcen geschaffen wird.
3. Stoffeinträge in die Umwelt sollen sich an der *Belastbarkeit der Umweltmedien* orientieren, wobei alle Funktionen zu berücksichtigen sind, nicht zuletzt auch die „stille“ und empfindlichere Regelungsfunktion.
4. Das Zeitmaß anthropogener Einträge bzw. Eingriffe in die Umwelt muss in einem ausgewogenen Verhältnis zum Zeitmaß für das *Reaktionsvermögen* der umweltrelevanten natürlichen Prozesse stehen.

Beitrag der Ökonomie zur Nachhaltigen Entwicklung³

Die moderne Volkswirtschaftslehre entstand im 18. und 19. Jh., die bedeutendste Schule wird *klassische Ökonomie* genannt, wesentliche Vertreter waren *Adam Smith, David Ricardo, Jean Baptist Say* und *John Stuart Mill*. Diese Ökonomen kannten die wichtige Rolle des Bodens, Umweltprobleme spielten keine Rolle. An sie anknüpfend entwickelte sich die *neoklassische Theorie* Ende des 19. Jh., sie stellt heute das herrschende ökonomische Lehrgebäude dar. Ihr Ausgangspunkt ist das Modell der vollständigen Märkte, auf denen alle Produktionsfaktoren und Güter mittels Tauschprozessen optimal verteilt werden sollen [1.17]. Natürliche Ressourcen und ihre Übernutzung werden hier nicht thematisiert.

Diese Sichtweise änderte sich in den 1970er Jahren als mit den Publikationen des Club of Rome, den sichtbar werdenden Übernutzungen und Unfällen sowie den beiden Erdöl-Preiskrisen deutlich wurde, dass die Märkte offensichtlich nicht in der Lage sind eine optimale Allokation (Einsatz/Verwendung) der natürlichen Ressourcen sicher zu stellen, für diese Güter herrscht *Marktversagen*. Aus dieser Erkenntnis entwickelte sich die *neoklassische Umwelt- und Ressourcenökonomie*.⁴ Diese Unterschule der neoklassischen Ökonomie zeigte, dass auf die Wirtschaftsakteure (Konsumenten und Unternehmen) sozial-ökonomische Faktoren einwirken, die dafür sorgen, dass die Mehrzahl der Akteure nicht in der Lage ist sich durchgehend umweltbewusst und nachhaltig zu verhalten. Diese Verhaltensweise wird auch durch stärkere Information und Aufklärung nicht verändert, da sie sich vor die Alternative gestellt hat, die betriebswirtschaftlich (nicht volkswirtschaftlich) preiswertere Öl-Heizung oder die Solaranlage anzuschaffen und sich dabei für die umweltschädliche Heizungsanlage entscheiden. Theoretisch wurde das durch die Theorie der Externen Effekte,⁵ der öffentlichen Güterproblematik⁶ und anderen sozial-ökonomischen Faktoren wie das Gefangenendilemma⁷ erklärt. Damit legte

³ Der Beitrag beruht auf dem Lehrbuch von Rogall H (2008): *Ökologische Ökonomie – eine Einführung*, 2. vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage, Wiesbaden. Hier findet sich auch die weiterführende Literatur. Dem Leser unbekannt Begriffe können in dem Online-Glossar nachgelesen werden: <http://www.holger-rogall.de/glossar.htm>

⁴ Wesentliche deutschsprachige Autoren sind: Endres A (2007): *Umweltökonomie*, 3. Auflage, Stuttgart; Cansier D (1996): *Umweltökonomie*, 2. Auflage, Stuttgart).

⁵ Bei der Theorie der externen Effekte wird gezeigt, wie die Verursacher von Umweltschäden die entstehenden volkswirtschaftlichen Kosten auf andere überwälzen (externalisieren) können und hierdurch die umweltschädlichen Produkte zu preiswert angeboten werden. Eine Übernutzung ist dadurch die zwingende ökonomische Folge (Ernst Ulrich von Weizsäcker nennt das „die Produkte sagen nicht die ökologische Wahrheit“ [1.8]).

⁶ Die Öffentliche-Güter-Problematik zeigt, dass die Akteure die natürlichen Ressourcen als öffentliche Güter ansehen, die keine Knappheitsgrenze haben, weil sie keinen oder zu geringen Preis haben (siehe das Verhalten vieler Menschen bei Freibier).

⁷ Für die einzelnen Wirtschaftsakteure ist es schwer, etwas für die Gemeinschaft zu tun, was ihren eigenen Nutzen beeinträchtigt. Ja selbst wenn der Akteur weiß, dass sein Verhalten gesellschaftliche Gefahren verstärkt, ist er kaum bereit auf seine Nutzenmaximierung zu verzichten, wenn er nicht sicher sein kann, dass alle anderen Menschen auch verzichten. Individuell ist dieses Verhalten nachzuvollziehen, da ein individueller Verzicht

die neoklassische Umweltökonomie zentrale Grundlagen für alle späteren nachhaltigkeitsorientierten Wirtschaftsschulen – ihre eigenen Beiträge zu einer Nachhaltigen Entwicklung blieben jedoch begrenzt.

Die *Ökologische Ökonomie* (andere Autoren sprechen von *Ökonomik*) hat sich in den 1980er Jahren (zunächst in den USA als *Ecological Economics*), aus der Kritik an der neoklassischen Umweltökonomie, zu einer eigenen Schule bzw. Teildisziplin innerhalb der Ökonomie entwickelt. Sie kann als ökonomische Theorie der Nachhaltigen Entwicklung unter Berücksichtigung der transdisziplinären Grundlagen bezeichnet werden, wobei z. Z. die Frage im Mittelpunkt steht, wie die Grenzen der natürlichen Tragfähigkeit eingehalten werden können.⁸

Über die Grundlagen einer *Neuen Umweltökonomie* wird seit Ende der 1990er Jahre im Zuge der Diskussion um den Beitrag der Ökonomie für eine Nachhaltige Entwicklung an der Fachhochschule für Wirtschaft Berlin (FHW) diskutiert. Sie versteht sich als Unterschule der Ökologischen Ökonomie, wobei sie die gemeinsamen Erkenntnisse in zehn Kernaussagen zusammenfasst (Rogall 2008, Kap. 3):

- (1) *Starke Nachhaltigkeit*: Die derzeitige Entwicklung der Menschheit wird als nicht zukunftsfähig betrachtet, Ökologische Ökonomen sehen daher die Notwendigkeit eines Neuen Leitbilds und bekennen sich zu einer Position der starken Nachhaltigkeit. Damit wird die Wirtschaft als ein Subsystem der Natur und die natürlichen Ressourcen größtenteils als nicht substituierbar angesehen. Das sog. Drei-Säulen-Modell, das von einer Gleichwertigkeit der Zieldimensionen ausgeht (ohne absolute Naturgrenzen), wird somit abgelehnt und stattdessen absolute Grenzen der Natur anerkannt. Im Mittelpunkt steht die dauerhafte Erhaltung und nicht der optimale Verbrauch der natürlichen Ressourcen.
- (2) *Pluralistischer Ansatz bei Abgrenzung zur neoklassischen Umweltökonomie*: Die Ökologischen Ökonomen fühlen sich einem Methodenpluralismus verpflichtet. Sie erkennen einerseits bestimmte Erkenntnisse der neoklassischen Umweltökonomie an (z. B. die sozial-ökonomischen Erklärungsansätze der Übernutzung der natürlichen Ressourcen und die daraus abgeleitete Diskussion um die Notwendigkeit politisch-rechtlicher Instrumente). Sie grenzen sich aber andererseits von einer Reihe Aussagen der neoklassischen Ökonomie ab (z. B. Verabsolutierung der Konsumentensouveränität,⁹ Diskontierung künfti-

tatsächlich an den Problemen nichts ändert. Nur wenn (fast) alle Menschen ihr Verhalten verändern, ließen sich die Probleme lösen. Ein gutes Beispiel ist die mangelnde Bereitschaft der meisten Menschen in den Industriestaaten auf Flugreisen zu verzichten, obgleich die weit überdurchschnittlichen Belastungen durch den Flugverkehr bekannt sind.

⁸ Wesentliche Autoren sind: Bartmann H (1996): *Umweltökonomie – ökologische Ökonomie*, Stuttgart; Beckenbach F et al. (1999–2005): *Jahrbücher Ökologische Ökonomie*, Marburg; Costanza R et al. (2001): *Einführung in die Ökologische Ökonomie*, Stuttgart.

⁹ Die Verwendung des Begriffs der K. beinhaltet das neoklassische Paradigma, dass niemand das Recht habe – auch die demokratisch legitimierten Entscheidungsträger nicht – Entscheidungen der Konsumenten zu ändern. Dieser Aussage liegt die Vorstellung zugrunde, dass Menschen immer zu ihrem eigenen Besten handeln (und nach der Neoklassik damit in der Summe auch für die Gesellschaft als Ganzes). In dieser theoretischen

ger Umweltkosten,¹⁰ Substituierbarkeit aller natürlichen Ressourcen, Position der schwachen Nachhaltigkeit, Monetarisierung aller Umweltschäden). Sie sehen daher den Beitrag der neoklassischen Ökonomie für eine Nachhaltige Entwicklung als sehr begrenzt an.

- (3) *Ersetzung des traditionellen Wachstumsparadigmas durch ein Nachhaltigkeitsparadigma*: Ein exponentielles Wachstum mit der Inanspruchnahme natürlicher Ressourcen über Jahrtausende kann es nicht geben. Damit wird langfristig die Ersetzung durch ein Nachhaltigkeitsparadigma zur notwendigen Voraussetzung einer dauerhaften Entwicklung. Über die mittelfristige Ausgestaltung existieren allerdings unterschiedliche Meinungen (Steady-State-Ansatz mit konstantem BIP versus selektives Wachstum, das den Ressourcenverbrauch trotz wirtschaftlicher Entwicklung senkt).
- (4) *Prinzip der ständigen Diskussion und Weiterentwicklung*: Die Ökologische Ökonomie ist keine statische Theorie, sondern sieht die Notwendigkeit weiterer Diskussionsprozesse und die Ausweitung des Erkenntnisinteresses entsprechend der globalen Entwicklung. Hierzu unterbreitet u. a. die Neue Umweltökonomie (als Unterschule) Vorschläge, z. B. die Forderung die ökologische Ökonomie zu einer *Nachhaltigen Ökonomie* weiterzuentwickeln, ein neues Menschenbild (homo cooperativus) u. v. a. m.
- (5) *Eine Nachhaltige Entwicklung beruht auf ethischen Prinzipien*: Die Ökologische Ökonomie erfolgt auf der Grundlage von ethischen Überzeugungen: Im Mittelpunkt stehen die Grundwerte der intra- und intergenerativen Gerechtigkeit und Verantwortung. Hinzu kommt die Anerkennung weiterer wichtiger Prinzipien: u. a. des Vorsorgeprinzips und der Prinzipien einer partizipativen Demokratie und Rechtsstaatlichkeit, aus der die Notwendigkeit eines gesellschaftlichen Diskursprozesses abgeleitet wird.
- (6) *Transdisziplinärer Ansatz*: Die Ökologische Ökonomie will über die rein ökonomische Betrachtungsweise (wie sie der neoklassischen Umweltökonomie eigen ist) hinausgehen und die ökonomischen Prozesse im Rahmen eines sozial-ökologischen Zusammenhanges unter Berücksichtigung der Wechselbeziehung zwischen Menschen und der übrigen Natur analysieren. Hierbei spielt die Nutzung der Erkenntnisse sowie eine enge Kooperation mit den

schen Vorstellung ist kein Platz für gesellschaftliche Ziele jenseits der Interessen der einzelnen Gesellschaftsmitglieder. Einige neoklassische Ökonomen gehen sogar soweit, dass sie die Konsumentensouveränität absolut setzen und eine Veränderung der politisch-rechtlichen Rahmenbedingungen durch die demokratisch legitimierten Entscheidungsträger als illegitim ablehnen.

¹⁰ Unter D. wird eine Methode der neoklassischen Ökonomie verstanden, mit der ein in der Zukunft auftretender Schaden in der Gegenwart bewertet bzw. errechnet werden soll. Empirisch lässt sich nachweisen, dass Menschen künftige Kosten/Schäden abzinsen (abwerten). So bewerten Menschen Schäden der Zukunft kleiner, als sie tatsächlich sind. Diese Verhaltensweise erklärt (ökonomisch), warum Menschen gegen gravierende Umweltgefahren (z. B. Klimaveränderungen) nur unzureichende Maßnahmen ergreifen.

Politik- und Rechtswissenschaften sowie mit den Natur- und Ingenieurwissenschaften eine besonders wichtige Rolle.

- (7) *Notwendigkeit der Operationalisierung des Nachhaltigkeitsbegriffs, Managementregeln und neuen Messsysteme*: Eine Sinnentleerung des Nachhaltigkeitsbegriffs soll durch die Formulierung von Prinzipien, Managementregeln und neuen Messsystemen für den Nachhaltigkeitsgrad und die Lebensqualität verhindert werden. Anders als die traditionelle Ökonomie, die Lebensqualität und Wohlstand (gemessen am BIP pro Kopf) gleichsetzt, benötigt eine Nachhaltige Entwicklung Ziel- und Indikatorensysteme.
- (8) *Notwendigkeit der Änderung der Rahmenbedingungen mittels politisch-rechtlicher Instrumente*: Mit Hilfe politisch-rechtlicher Instrumente sollen die Rahmenbedingungen so verändert werden, dass ein nachhaltiges Verhalten für Konsumenten und Produzenten vorteilhafter wird, als sich so zu verhalten wie bisher. Hierzu werden der *Standard-Preis-Ansatz*¹¹ und der Ansatz der *meritorischen Güter*¹² verwendet.
- (9) *Sozial-ökologische Markt- oder Gemischtwirtschaft*: Ökologische Ökonomen lehnen eine reine Marktwirtschaft ebenso ab wie zentrale Verwaltungswirtschaften, weil sie davon überzeugt sind, dass nur marktwirtschaftliche Systeme mit einem sozial-ökologischen Ordnungsrahmen zukunftsfähig sind. Danach muss die Politik aktiv eingreifen, um eine Nachhaltige Entwicklung sicherzustellen und die Folgen von Marktversagen zu vermindern.
- (10) *Anerkennung besonderer globaler Voraussetzungen für eine Nachhaltige Entwicklung*: Als zentrale Bedingungen werden u. a. anerkannt: Einführung eines Ordnungsrahmens, Senkung des Pro-Kopf-Ressourcenverbrauchs der Industrieländer, um 80–90 % bis 2050 und Verminderung der Bevölkerungszunahme der Entwicklungsländer. Hierbei wird akzeptiert, dass die Industrieländer aufgrund der historischen Entwicklung und der größeren Leistungsfähigkeit eine besondere Verantwortung für die Verwirklichung der intragenerativen Gerechtigkeit, globalen Nachhaltigkeit und fairen Handelsbeziehungen tragen.

¹¹ Die demokratisch legitimierten Entscheidungsträger legen hiernach einen bestimmten Umweltstandard fest (z. B. die Höhe des Verbrauchs an natürlichen Ressourcen), der dann über die Erhebung von Umweltabgaben erreicht werden soll. Die Höhe der Abgaben wird durch ein mehrjähriges Trial-and-Error-Verfahren variiert, bis schließlich die Abgabenhöhe gefunden ist, mit der der Umweltstandard eingehalten wird.

¹² M. sind *kollektive Güter*, die der Staat über Steuereinnahmen finanziert und entweder kostenlos anbietet oder preislich subventioniert, weil sie gesamtwirtschaftlich oder gesellschaftlich bedeutsam sind (positive externe Effekte erzeugen), Konsumenten und Produzenten aber nicht ausreichende Geldmittel für sie aufwenden (Marktversagen). Bekannte Beispiele sind Infrastruktureinrichtungen (z. B. Bildungseinrichtungen), soziale Sicherungssysteme, Arbeits- und Verkehrssicherheit *und* natürliche Ressourcen. In diesen Fällen muss der Gesetzgeber zu allgemeinverbindlichen Regelungen kommen (Abgaben und gesetzliche Pflichten z. B. Gurtanschnallpflicht im PKW).

Die *Neue Umweltökonomie* vertritt die Kernaussagen der Ökologischen Ökonomie, für einige Punkte empfiehlt sie aber eine Weiterentwicklung der Theorie, u. a.: (1) selektives Wachstum statt Steady-State, (2) grundlegende Reform der traditionellen Ökonomie und ihrer Grundlagen, (3) Entwicklung eines realitätsnäheren Menschenbildes („homo cooperativus“ genannt), (4) Schaffung neuer Rahmenbedingungen („ökologische Leitplanken“), statt Hoffnung auf Bewusstseinswandel (Rogall 2008, Kap. 4). Als besonders wichtig wird die Diskussion um die Vereinbarkeit von wirtschaftlichem Wachstum und Nachhaltiger Entwicklung angesehen. Anders als die Vertreter einer Steady-State-Economy mit konstantem BIP strebt die Neue Umweltökonomie ein selektives Wachstum an, bei dem nur das wachsen soll, was keine Gefahr für die natürliche Tragfähigkeit darstellt. Hierzu fordert sie die Einhaltung der *Formel für eine Nachhaltige wirtschaftliche Entwicklung*.¹³ Sie spricht statt von sozialen von *sozial-kulturellen* Zielen, da hierdurch die partizipativen und demokratisch-rechtsstaatlichen Ziele besser zu integrieren sind.

In einem erweiterten Zielsystem (Abb. 1.2) geht die *Neue Umweltökonomie* über die ökologische Dimension der Nachhaltigkeit hinaus und fordert – innerhalb der natürlichen Tragfähigkeit – hohe Standards für alle Dimensionen



Abb. 1.2 Zielsystem einer Nachhaltigen Entwicklung (nach Rogall und Treschau [1.18])

¹³ Nachhaltige wirtschaftliche Entwicklung (Nachhaltigkeitsformel): Die Neue Umweltökonomie akzeptiert wirtschaftliches Wachstum (Δ BIP) im Rahmen der Formel für eine wirtschaftlich Nachhaltige Entwicklung (Δ Ressourcenproduktivität $>$ Δ BIP). Die Einhaltung dieser Formel soll sichergestellt werden, indem politisch-rechtliche Instrumente ökologische Leitplanken schaffen. Somit tritt an die Stelle des ökonomischen Ziels der größtmöglichen Steigerung des BIP die Steigerung der Lebensqualität (als Summe vieler Qualitätsziele und des selektiven Wachstums oder Entwicklung).

Stand der Umsetzung in Politik, Recht und Verwaltung – Beispiel Schweiz

Neue Entwürfe zur Ausgestaltung von politischen Rahmenbedingungen zur Nachhaltigkeit, die in der Schweiz entwickelt werden [1.19], zeigen, dass die klassischen Umweltvorschriften nicht ausreichen, die Akteure zum schonenden Umgang mit den Ressourcen anzuhalten. Gründe sind vor allem die dauerhaften, mehr oder weniger exklusiven Eigentums- und Nutzungsrechte, aber auch z. T. konkurrierende Infrastrukturpolitiken (Verkehr, Zivilluftfahrt, Energie und Kommunikation), sowie die Agrar- und Regionalpolitik. Zudem erscheinen manche gängigen Konzepte von nachhaltiger Entwicklung in einem problematischen Licht, wenn sich diese nicht an Ressourcenbeständen, sondern an politisch mehr oder weniger erwünschten Zuständen in ausgewählten Segmenten von Umwelt, Gesellschaft oder Wirtschaft orientieren. Da diese Politik indirekt sogar Übernutzungen fördern kann, „verlangt das Nachhaltigkeitsgebot den Einbezug der Inputseite industrieller, reproduktiver oder urbaner Metabolismen, und nicht nur die Steuerung des Outputs“ [1.20]. Der neue Ansatz befasst sich mit Fragen der politischen Konstruktion von Ressourcen, der Definition der zulässigen Erntemengen (*Globalquoten*) sowie der Umsetzung von Globalquoten in *individuelle Nutzungsrechte*.

In der Praxis sind für eine nicht nachhaltige Ressourcennutzung die mangelhafte Koordination durch die politisch-administrativen Instanzen und unscharf definierte Nutzungsrechte verantwortlich. Diese beiden Steuerungsdimensionen – Koordination und Inhalt – ermöglichen eine Bewertung der *institutionellen Regime*, das bedeutet die Gesamtheit der Regulierungen der betroffenen Ressource. In Abb. 1.3 beschreibt die *Regimekohärenz* die Fähigkeit, die Nutzungsrechte und -ansprüche so abzustimmen, dass Rivalitäten friedlich gelöst werden; das *Ausmaß* des Regimes gibt an, welche Nutzungen der bereitgestellten Güter und Dienstleistungen reguliert werden und welche nicht. Die meisten heutigen Regime natürlicher Ressourcen (der Schweiz) liegen im Feld der komplexen Regime; d. h. die Kohärenzdefizite garantieren noch keine nachhaltige Entwicklung dieser Ressource.

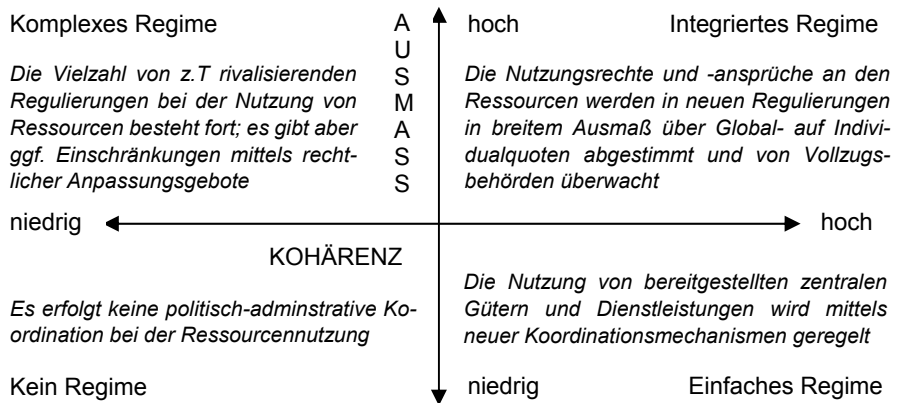


Abb. 1.3 Typisierung institutioneller Regime natürlicher Ressourcen (nach [1.19, 1.21])

Bilanzen

Das Leitbild „Nachhaltigkeit“ mit seinen Umweltqualitätszielen und Umwelthandlungszielen (in Form messbarer und überprüfbarer Ziele) erfordert die Erstellung von *Sachbilanzen*, eine *Wirkungsabschätzung* und davon abgeleitete *Handlungsstrategien*. Einen zentralen Aspekt bildet die Stoffbilanz, die den Eintrag von Material, Energie und Wasser in den Wirtschafts- und Gesellschaftsbereich mit dem Output in Form von Abfall, Emissionen und Abwasser misst, vergleicht und bewertet¹⁴ (Abb. 1.4).

Agenda 21

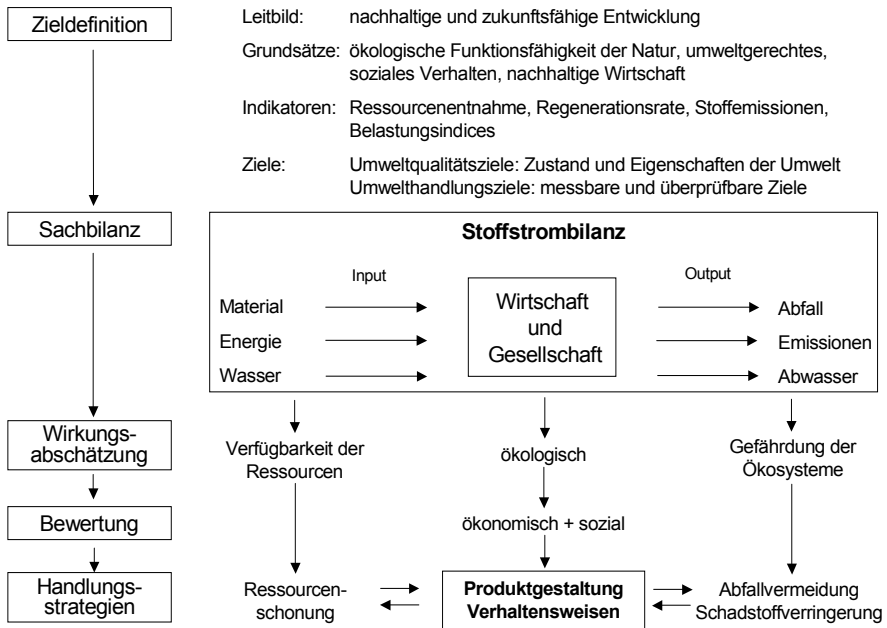


Abb. 1.4 Definitionen und Aufgaben im Leitbild „Nachhaltige Entwicklung“ [1.22]

Modelle

Bei der Erstellung von Ökobilanzen müssen die Ergebnisse von Sachbilanzen und Wirkungsabschätzungen kombiniert und evtl. zu einer einzigen Maßzahl aggregiert werden. In einer Übersicht „Kreislaufwirtschaft und nachhaltige Entwicklung“ vergleicht Moser [1.23] die unterschiedlichen *Modelle*, die derzeit bei einer Bewertung der „Nachhaltigkeit“ eingesetzt werden:

¹⁴ Dieser Betrachtungsansatz „Input“, „Wirtschaft/Gesellschaft“, „Output“ wird uns später bei den gesetzlichen Regelungen wieder begegnen; wir werden dann den Bereich „Wirtschaft/Gesellschaft“ durch „Technischer Prozess“ ersetzen und die Input-/Output-Größen entsprechend definieren (Abb. 2.1, 2.2, 2.7).

- *Expertenurteil*: verbal-argumentative Beurteilung verschiedener Alternativen;
- *Nutzwertanalyse*: Verrechnung von qualitativen und halbquantitativen Größen mit quantitativen Werten auf der Grundlage einer formaler Vorgangsweise;
- *Ökonomische Modelle*: Ziel ist die Ermittlung der „wahren“ Kosten durch Umlage von Schäden an Mensch und Umwelt auf den Prozess, die Dienstleistung oder das Produkt;
- *Grad der Nachhaltigkeit*: Vergleich von Anlagen-Alternativen unter Berücksichtigung der Knappheit von Ressourcen und die Erhaltung der ökologischen Funktionsfähigkeit; Kriterien sind Rohstoffe, Boden, Wasser, Luft, Bodennutzung und Deponieraum;
- *Grenzwertmodell der kritischen Volumina*: über die Immissionsgrenzwerte für Wasser, Boden und Luft werden kritische Volumen berechnet, die ein Maß dafür sind, wie viel ‚sauberes‘ Volumen für einen Prozess, ein Produkt oder eine Dienstleistung benötigt wird;
- *Stoffflussmodell*: beruht auf dem Ansatz der „ökologischen Knappheit“; diese kann in der Aufnahmekapazität der Kompartimente Wasser, Luft und Boden, in der Erschöpfbarkeit eines Rohstoffs oder in der Verfügbarkeit von Deponievolumen liegen;
- *MIPS (Material Intensity Per Unit Service)*: Vergleich der Umweltbelastungsintensität von Infrastrukturen, Gütern und Dienstleistungen über ihren gesamten Lebenszyklus, errechnet aus Material- und Energieflüssen für Produktion, Gebrauch, Entsorgung, Transport etc.;
- *Toxikologische Bewertung*: aus Ökotoxizitätsfaktoren für >400 Substanzen;
- *Vermischungsmodell*: basiert auf dem Entropieansatz.

Das Expertenurteil und die Nutzwertanalyse sind an die Beurteilung einer Person oder eines Teams gebunden und gewährleisten daher im Unterschied zu den Modellen auf der Basis einer mathematischen Berechnung nur bedingt eine Reproduzierbarkeit. Qualitative Größen wie z. B. Landschaftsästhetik oder gesellschaftliche Werte sind jedoch nur auf diesem Wege zu ermitteln. Der MIPS und das Vermischungsmodell führen die Bewertung über die Massenbilanzen als *messbare Größen* durch. Der aus vielen Größen zusammengesetzte Ökotoxizitätsfaktor bei der toxikologischen Bewertung ist dagegen wesentlich schwieriger zu handhaben, was sich letztlich in allen damit verbundenen Modellen niederschlägt.

Die Nutzwertanalyse zeigt im Vergleich zum Expertenurteil eine relativ hohe Aussagekraft; geringere Aussagekraft weisen der MIPS und das Vermischungsmodell wegen des fehlenden toxikologischen Moduls auf. Der regionale Bezug der Modelle ist insbesondere beim Grad an Nachhaltigkeit und dem Stoffflussmodell gegeben. Den *Faktor Zeit*, d. h. Nachbildungsrate und Abbaugeschwindigkeit von Stoffen, können Expertenurteil und Nutzwertanalyse ebenso integrieren wie den Stand der Technik oder z. B. den Unterschied zwischen dem Einsatz von regenerativen und fossilen Energien. Zusammenfassend kann man feststellen, dass das Kernproblem aller Bewertungsmodelle in der *Gewichtung* der einzelnen Parameter bzw. Kriterien liegt, die dabei zur Berechnung verwendet werden [1.23].

Indikatoren

Umweltindikatoren sind Kenngrößen zur Erfassung, Beschreibung und Bewertung von komplexen Umweltsachverhalten. Indikatoren sollen rechtzeitig Fehlentwicklungen an (Signal- und Warnfunktion) anzeigen, die Auswahl erforderlicher Maßnahmen zur Zielerreichung (Planungsfunktion) unterstützen und durch die Darstellung von Trendverläufen eine Überprüfung der dauerhaft umweltgerechten Entwicklung ermöglichen (Kontrollfunktion). Ein beispielhaftes Umweltindikatorensystem einer *länderbezogenen Agenda 21* wurde vom Bayerischen Landesamt für Umweltschutz entwickelt [1.24]. Grundlage ist der *DPSIR*-Ansatz der Europäischen Umweltagentur mit seinen fünf Kategorien (Abb. 1.5); in Tabelle 1.2 werden jeweils zwei Beispiele von Nachhaltigkeits-Indikatoren aus den vier Bereichen Natur und Landschaft , Ökosysteme, Klima und Mensch, Ressourcen aufgeführt.

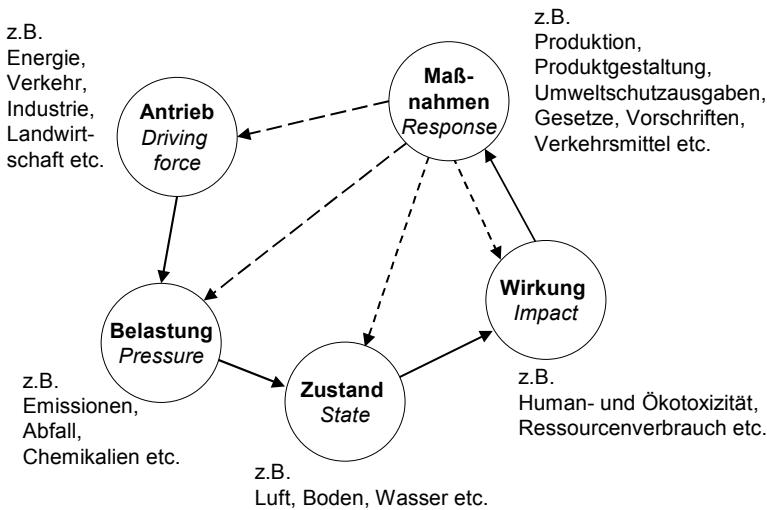


Abb. 1.5 DPSIR-Ansatz der Europäischen Umweltagentur (EEA)

Tabelle 1.2 Zuordnung zum *DPSIR*-Ansatz. *Betriebliche Indikatoren s. Abschn. 2.2.1

Umweltindikatorsystem	Indikator (Definition)	DPSIR
Artengefährdung	Rote Liste Arten, u. a. [Index]	S
Ökologisch wertvolle Lebensräume	Moore, Magerrasen, u. a. [ha]	I
Düngemitelesatz	Mineralische N-Dünger [kg/(ha·a)]	P
Eintrag persistenter Stoffe	As, Cd, Cr, Pb, Zn, u. a. [Index]	S
Luftqualitätsindex	NO ₂ , SO ₂ , CO, O ₃ , PM ₁₀ [Index]	S
Lärmbelastung im Wohnbereich	>55/>65 dB(A) [% Bevölkerung]	S
Energieverbrauch	Primärenergieverbrauch [PJ/a]	D
Umweltmanagement*	EMAS-validierte Betriebe [%]	R

Der Indikatorenbericht 2006 des Statistischen Bundesamts „Nachhaltige Entwicklung in Deutschland“ [1.25] bezieht sich auf die Initiative der Bundesregierung „Perspektiven für Deutschland“ aus dem Jahr 2002. Von den 21 Nachhaltigkeitsindikatoren zeigen die unmittelbar umweltbezogenen Beispiele nach einer Bilanz der Umweltverbände [1.26] unter anderen folgende Entwicklungen:

- Energie-/Rohstoffproduktivität (Indikator 1a/1b). Der *reale* Energieverbrauch ist im Vergleich zu 1990 nur um 3 Prozent zurückgegangen. Um wirklich voran zu kommen, müsste die Nachhaltigkeitsstrategie hier klare Ziele setzen.
- Treibhausgasemissionen (2). Die Vorgaben sind zwar fast realisiert, doch sind diese als Klimaschutzziel ungenügend. Maßnahmen wie die Selbstverpflichtungen bei der Automobil- und Kraftwerksindustrie werden noch immer blockiert.
- Anteile erneuerbarer Energien am Energieverbrauch (3). Das Vorzeigeprojekt zur nachhaltigen Entwicklung, aber der prioritäre Ausbau des ineffizienten Biosprits ginge nur auf Kosten einer erneuten Intensivierung der Landwirtschaft.
- Anstieg der Siedlungs- und Verkehrsfläche (4). Die Realisierbarkeit der als unzureichend angesehenen Vorgaben ist derzeit nicht erkennbar. Von zentraler Bedeutung wäre eine ökologische Reform des Gemeindefinanzsystems.
- Artenvielfalt und Landschaftsqualität (5). Das Ziel wird bisher klar verfehlt; die politischen Rahmenbedingungen (z. B. Schutzgebietsnetz, naturnahe Bewirtschaftung, modernes Bundesnaturschutzgesetz) sind schleunigst zu verbessern.
- Stickstoffüberschuss/ökologischer Landbau (12a/12b). Der Düngemittleinsatz lässt sich derzeit rechtlich nicht auf ein umweltverträgliches Maß zurückführen. Beim Ökolandbauziel liegt die Entwicklung gravierend zurück.
- Schadstoffbelastung der Luft (13). Die Reduktion der klassischen Luftschadstoffe profitiert noch vom Zusammenbruch der ehemaligen DDR-Industrie- und Verkehrssektoren. Probleme vor allem bei NO_x und Feinstaub aus dem Verkehr.

Insgesamt liefert der Indikatorenbericht des Statistischen Bundesamtes deutliche Hinweise, dass bei gleich bleibendem Tempo und ohne weitere Anstrengungen die Nachhaltigkeitsziele, vor allem bei der Ressourcenschonung, Flächeninanspruchnahme, Artenvielfalt und Schadstoffbelastung der Luft nicht zu erreichen sind.

Ergänzend zum nationalen Nachhaltigkeits-Indikatorensatz hat das Umweltbundesamt ein Umwelt-Kernindikatorensystem (KIS) entwickelt, das mit einer Vielzahl weiterer Indikatoren umfassend Ursache und Wirkungen von Umweltbelastungen abbilden kann [1.27]. *KIS* spiegelt die Leitthemen des 6. Umweltaktionsprogramm der Europäischen Gemeinschaft wider, mit denen alle Schutzgüter erfasst und die derzeitige Umweltpolitik maßgeblich bestimmt werden: (1) Klimaänderungen, (2) biologische Vielfalt, Naturhaushalt und Landschaft, (3) Umwelt, Gesundheit und Lebensqualität, (4) Ressourcennutzung und Abfallwirtschaft.

Das deutsche Umwelt-Kernindikatorensystem umfasst 16 Themen von „Treibhauseffekt“ bis „Bodenressourcen“ und enthält mehr als 50 Indikatoren; letztere wurden nach den umweltpolitischen Prioritäten in Deutschland sowie nach einer möglichst großen Vergleichbarkeit mit den wichtigsten internationalen Indikatoren ausgesucht. Die einzelnen Indikatoren können dabei unter ihrer jeweiligen *DPSIR*-Zuordnung aufgerufen werden [1.27].

1.1.3 Strategische Handlungsfelder – Perspektiven 2020

Schwerpunkte ökologischer Herausforderungen [1.28]

Es besteht ein internationaler Konsens über einen Kern von globalen ökologischen Herausforderungen, der die Zielbereiche (1) Klimaschutz, (2) Erhalt biologischer Vielfalt, (3) Wasserversorgung incl. Abwasserentsorgung, Gewässerschutz sowie (4) den Gesundheitsschutz umfasst. Die Auswahl beruht auf Kriterien¹⁵ wie dem langfristigen Charakter, den Gesundheitsrisiken, den ökologischen und ökonomischen Schäden und den sozialen und kulturellen Auswirkungen. In regionaler Hinsicht verlagern sich die Schwerpunkte allmählich hin zu Schwellen- und Entwicklungsländern. Hohe Wachstumsraten wie in China, aber auch in Indien, verschärfen die Herausforderungen in diesen Ländern und weltweit. Unterschiede für Ländergruppen zeigen sich bei der Untersetzung auf spezifischere Problemstellungen:

1. Klimaschutz

- Emissionsreduzierungen von Klimagasen
- Steigerung der Energieproduktivität
- Steigerung des Anteils erneuerbarer Energien
- Verringerte Transportintensität
- Steigerung des Schienenverkehrsanteils

2. Biologische Vielfalt

- Reduzierung von Flächenverbrauch
- Verringerung von Landschaftszerschneidungen und Suburbanisierung,
- Schutz von Böden vor Erosion, Verdichtung, Versiegelung, Versalzung, ...
- Schutz von Wäldern
- Bekämpfung der Wüstenbildung
- Schutz von Feuchtgebieten, Küstenzonen, Meeresschutz
- Nachhaltige Bewirtschaftung von Fischbeständen

3. Wasserversorgung

- Gewässerschutz
- Grundwasserschutz
- Reduzierung von Nährstoffeinträgen
- Abwasserbehandlung
- Zugang zu sanitären Einrichtungen

4. Gesundheitsschutz

- Reduzierung der Verwendung von Pestiziden
- Reduzierung von Luftbelastungen durch den Verkehr
- Chemikalienpolitik
- Lärmschutz

¹⁵ Im allgemeinen werden diese Kriterien nicht in formellen Verfahren systematisch festgelegt. Deswegen sind *innerhalb* des Kerns ökologischer Herausforderungen Prioritäten nicht auszumachen.

Beitrag der strategischen Handlungsfelder zu Problemlösungen [1.28]

Problemlösungen für die in den kommenden Jahren weltweit zu erwartenden ökologischen Herausforderungen lassen sich sechs strategischen Handlungsfeldern zuordnen: (i) Erneuerbare Energien, (ii) Energie- und Rohstoffeffizienz sowie Kreislaufwirtschaft, (iii) Nachhaltige Wasserwirtschaft, (iv) Nachhaltige Mobilität, (v) Weiße Biotechnologie (Abschn. 1.3.5) und (vi) Abfall- und Entsorgungstechnologien. Die Verknüpfung dieser Handlungsfelder mit den Schwerpunktbereichen der ökologischen Herausforderungen („Zielbereiche“) ermöglicht eine übersichtliche Darstellung der mittelfristigen Perspektiven, besonders im Hinblick auf die Akzeptanz und die Marktchancen von technologischen Lösungen (Tabelle 1.3).

Bei den *direkten Beiträgen* der strategischen Handlungsfelder zu Problemlösungen in den Zielbereichen kommen dem Einsatz von Erneuerbaren Energien und der Erhöhung der Energie- und Rohstoffeffizienz für den Klimaschutz sowie einer Nachhaltigen Wasserwirtschaft für die globale Wasserversorgung erste Priorität zu (Tabelle 1.3, jeweils obere Zeilen mit geschätzten Einflussstärken in Klammern).

Tabelle 1.3 Direkter (in Klammern) und indirekter Beitrag strategischer Handlungsfelder zur Problemlösung in den Zielbereichen („ökologische Herausforderungen“, nach [1.28])

	Klimaschutz	Biologische Vielfalt	Wasser-versorgung	Gesundheits-schutz
<i>Erneuerbare Energien</i>	(+++) +++	(-) ++	(-) ++	(++) +++
<i>Energie- und Rohstoffeffizienz</i>	(+++) +++	(-) ++	(++) +++	(++) +++
<i>Nachhaltige Wasserwirtschaft</i>	(-) -	(+) ++	(+++) +++	(++) +++
<i>Nachhaltige Mobilität</i>	(++) ++	(-) +	(-) +	(++) +++
<i>Weiße Biotechnologie</i>	(++) ++	(-) +	(-) +	(-) +
<i>Abfall-, Entsorgungstechnologien</i>	(-) +	(+) ++	(+) ++	(++) ++

Während in vielen weniger entwickelten Ländern die Umweltbelastungen durch die Industrie noch eine wichtige Rolle spielen, steht in den reicheren Ländern die Entkopplung der von den drei Sektoren Energie, Verkehr und Landwirtschaft ausgehenden Umweltbelastungen vom Wirtschaftswachstum im Vordergrund. Maßnahmen in den strategischen Handlungsfeldern tragen in mehr oder weniger starkem Maße zur Reduzierung der Belastungen bei, die in diesen Wirtschaftssektoren entstehen. Außerdem bestehen zwischen den zentralen Zielbereichen enge Interdependenzen („spillovers“). Als *Gesamteinschätzung* ergibt sich ein hoher Beitrag der betrachteten strategischen Handlungsfelder zur Problemlösung in praktisch allen Zielbereichen (Tabelle 1.3, jeweils untere Zeile für geschätzte Einflussstärken).

Prioritäten der Forschungsförderung im Umweltschutz – Beispiel Schweiz

Neben der Erarbeitung von wissenschaftlich fundierten Grundlagen für umweltpolitische Entscheidungen soll die Umweltforschung in der Schweiz das Verständnis für ökologische Prozesse, für die Zusammenhänge von Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft und für das Wechselspiel von individuellem und kollektiven Handeln fördern [1.29]. Für den Politikbereich Umwelt erarbeitet das Bundesamt für Umwelt (BAFU) in einem breiten Beteiligungsprozess jeweils für vier Jahre ein gesamtschweizerisches Forschungskonzept Umwelt (FKU), das als Grundlage für Behörden bei Kreditbeschlüssen und Gesetzesänderungen, als Strategie- und Informationsinstrument sowie als Referenz für Entscheidungen im Bereich der Umweltforschung dient. 2004 betrug der Anteil der öffentlichen Hand rund 384 Millionen Schweizer Franken, derjenige der Privatwirtschaft rund 135 Millionen Schweizer Franken.

In der Tabelle 1.4 sind die Schwerpunkte der Umweltforschung in der Schweiz für den Zeitraum 2008 bis 2011 aufgeführt, mit der Wissen in vier Handlungsfeldern erarbeitet werden soll: (1) Umgang mit Zielkonflikten, (2) Förderung von umweltverträglichen Handeln (z. B. Anreizsysteme), (3) Umsetzung von Vorsorge-, Vermeidungs- und Anpassungsstrategien und (4) Umweltechnologie.

Tabelle 1.4 Schwerpunkte und Prioritäten für die Umweltforschung in der Schweiz im Zeitraum 2008 bis 2011 [1.29]

	Systemwissen	Zielwissen
Schwerpunkt I <i>Handlungsmöglichkeiten von Mensch, Wirtschaft und Gesellschaft für die Erhaltung und Gestaltung einer intakten Umwelt</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Wertvorstellungen • Determinanten der Umweltpolitik 	<ul style="list-style-type: none"> • Umweltverträgliche Wirtschaft
Schwerpunkt II <i>Schutz der Umwelt und der menschlichen Gesundheit vor Schadstoffen sowie biotischen und physikalischen Belastungen</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Nanomaterialien • Feinstaub • Neobiota • nichtionisierende Strahlung • hormonaktive Stoffe 	<ul style="list-style-type: none"> • Schwellenwerte • Zielkonflikte
Schwerpunkt III <i>Schutz und schonende Nutzung der natürlichen Ressourcen</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Biodiversität • Landnutzung/Landschaft als Lebensraum 	<ul style="list-style-type: none"> • Schwellenwerte • Zielkonflikte
Schwerpunkt IV <i>Wandel im Klimasystem und dessen Auswirkungen auf Natur und Gesellschaft</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Impactforschung • räumliche/zeitliche Variabilität 	<ul style="list-style-type: none"> • Schwellenwerte • Zielkonflikte • Verminderungs-/Anpassungsstrat.
Schwerpunkt V <i>Umgang der Gesellschaft mit Naturgefahren und technischen Risiken / integrales Risikomanag.</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Gewässersysteme und bauliche Eingriffe • Gentechnik 	<ul style="list-style-type: none"> • Zielkonflikte • Risikobewertung (u. a. neue Technologien)

Perspektiven der globalen Umweltschutzwirtschaft

Die Analysen zur Innovationsdynamik und zum Marktpotenzial zeigen ein insgesamt günstiges Bild für die Technologien der in Tabelle 1.3 aufgeführten strategischen Handlungsfelder; folgende Aspekte sind hervorzuheben [1.28]:

- In Zukunft werden die Technologien zur Verbesserung der *Energie- und Rohstoffeffizienz* erheblich an Bedeutung gewinnen. Das Marktpotenzial ist als sehr hoch, das technologische Entwicklungspotenzial als dynamisch einzustufen; unterstützt wird dies durch eine durchschnittlich ansteigende Patentaktivität.
- In den letzten Jahren war ein „Take-off“ bei den *erneuerbaren Energien* zu verzeichnen. Das technische Entwicklungspotenzial wird insgesamt als sehr hoch eingeschätzt. Unterstützt wird dies durch Abschätzungen zu den kurz- bis mittelfristigen Kostendegressionen und eine stark ansteigende Patentaktivität.
- Der gesellschaftliche Stellenwert der *Mobilitätsbedürfnisse* und der parallel zunehmende Handlungsdruck zum Schutz der Umwelt zeigen ein außerordentlich hohes Marktpotenzial für umweltfreundliche Mobilitätstechnologien. Das technologische Entwicklungspotenzial wird insgesamt als hoch eingeschätzt.
- Die wirtschaftliche Bedeutung und das Marktpotenzial im *Wasserbereich* sind enorm. Hier trifft ein sich zunehmend in kaufkräftiger Nachfrage niederschlagenden Bedarf in den sich schnell entwickelnden Aufholländern auf den Reinvestitionsbedarf in den Industrieländern. Ein ganz außerordentlicher Anstieg ist bei den integrierten (semi-)dezentralen Wassertechnologien zu verzeichnen.

Aggregiert man die *Wachstumsprojektionen der Unternehmen*, steht zu erwarten, dass Umwelttechnologien das Potenzial haben, klassische Industriezweige wie etwa den Fahrzeugbau in einer längeren Perspektive beim Branchenumsatz zu überholen (Abb. 1.6); nach diesen Schätzungen werden die Umwelttechnologien auch einen immer höheren Anteil an der volkswirtschaftlichen Wertschöpfung in Deutschland erhalten (von ca. 4% in 2005 ein Anstieg auf ca. 16% in 2030).

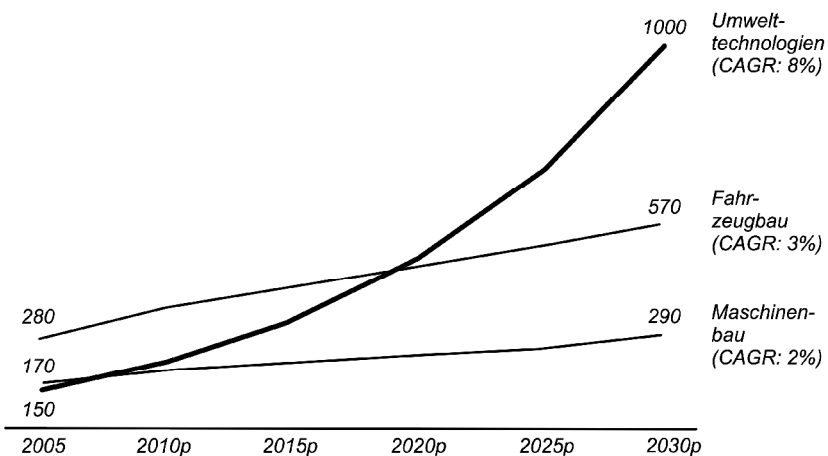


Abb. 1.6 Umsatzprognose Umwelttechnologien in Deutschland (Mrd. €; CAGR – Compound Annual Growth Rate; nach Roland Berger Strategy Consultants 2006 in [1.30])

1.1.4 Umsetzung von globalen Klimaschutzziele

Der Klimawandel als Folge eines verstärkten Eintrags von „Treibhausgasen“ in die obere Erdatmosphäre wird in seinem Ausmaß vermutlich alle bisherigen Umweltkrisen übertreffen. Trotz der noch beträchtlichen Unsicherheiten bei der Interpretation der bislang vorliegenden Daten und Modelle muss nach der überwiegenden Meinung von Experten mit einer weiteren Erwärmung der unteren Erdatmosphäre, hauptsächlich ausgelöst durch anthropogene Einflüsse, gerechnet werden.

Die internationale Reaktion auf diese Befunde entwickelt sich über die großen Konferenzen der Vereinten Nationen: Auf der ersten *Weltklimakonferenz* 1979 setzte sich die Erkenntnis durch, dass es sich beim Klimawandel um ein ernst zu nehmendes Problem handelt. Das Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen (die „Klimakonvention“) von 1992 wurde in Rio de Janeiro von 154 Staaten und der Europäischen Gemeinschaft unterzeichnet. Auf der COP-3 (Konferenz der Vertragsparteien) im Dezember 1997 wurde das *Protokoll von Kyoto* verabschiedet. Es verpflichtet die Industrieländer rechtsverbindlich dazu, ihre gemeinsamen Treibhausgasemissionen innerhalb des Zeitraums 2008 bis 2012 gegenüber dem Ausgangsjahr 1990 um mindestens 5 Prozent zu reduzieren. Die EU als Ganzes hat dabei 8 Prozent Reduktion übernommen; unter bestimmten Bedingungen hat sich im März 2007 die EU sogar bereit erklärt, bis 2020 die Treibhausgas-Emissionen um 20–30 Prozent gegenüber 1990 zu reduzieren [1.31]. (In dem *Kasten* auf S. 25 wird eine Einschätzung über den Beitrag von einzelnen konventionellen und regenerativen Energiequellen im Jahr 2050 gegeben.)

Weitere Verpflichtungen zur Minderung der Treibhausgasemissionen sind notwendig. Dabei sind Kosten für die Erschließung von Emissionsminderungspotenzialen von Staat zu Staat höchst unterschiedlich. Diesem Problem tragen die *Flexiblen Mechanismen* des Kyoto-Protokolls Rechnung. Im Rahmen des am 01.01.05 auf EU-Ebene begonnenen Emissionshandels können durch die Umsetzung der *Linking Directive* auch Zertifikate durch emissionsmindernde Projekte im Rahmen des Clean Development Mechanism (*CDM*) und von Joint Implementation (*JI*) durch außerhalb der EU-Grenzen durchgeführte Projekte generiert werden. Durch den internationalen Emissionshandel soll erreicht werden, dass die Emissionen dort gemindert werden, wo dies am kostengünstigsten möglich ist [1.32].

Das zugrunde liegende Prinzip bei *JI* und *CDM* ist gleich: Ein Investor führt in einem Gastland ein Projekt durch, das die Emissionen mindert und erhält dafür Emissionsgutschriften. Die gemeinsame Umsetzung sieht Projekte zwischen Industriestaaten vor, während der Mechanismus für umweltgerechte Entwicklung gemeinsame Projekte von Industriestaaten und Entwicklungsländern betrifft. Voraussetzung für eine Generierung von Emissionsgutschriften ist, dass die Emissionsreduktionen zusätzlich zu Maßnahmen stattfinden, die auch ohne das Projekt erfolgt wären. Dieses wird anhand eines Referenzszenarios und gegebenenfalls weiterer Kriterien überprüft; ersteres gibt an, welche Emissionen ohne die Durchführung des Projekts entstanden wären. Über die Flexiblen Mechanismen hinaus ist es möglich, die Verpflichtung mit Maßnahmen im Bereich Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (als Kohlenstoffsenken) zu erfüllen [1.32].

„Sicherheitsrisiko Klimawandel“ Gutachten des WBGU, 06.06.2007 [1.33]

Zum G8-Gipfels in Heiligendamm stellt der Wissenschaftliche Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) sein neues Gutachten vor. Die Regierungsberater kommen zu dem Schluss, dass der Klimawandel ohne entschiedenes Gegensteuern die Anpassungsfähigkeit vieler Gesellschaften überfordern wird. Dadurch kann es in einigen Weltregionen zu innerstaatlichen Zerfalls- und Destabilisierungsprozessen mit diffusen Konfliktstrukturen, zwischenstaatlichen Konflikten und einer Überforderung des internationalen Systems kommen. Die WBGU empfiehlt die Umsetzung folgender Maßnahmen:

- *Internationale Klimapolitik ehrgeizig weiterentwickeln.* Deutschland und die EU sollten mit den Schwellenländern strategische „Dekarbonisierungspartnerschaften“ eingehen.
- *KSZE ähnliche Prozesse anstoßen:* nach dem Vorbild der Konferenz für Sicherheit und Zusammenarbeit in Europa müssen für eine multilaterale Ordnung u. a. die aufstrebenden Führungsmächte China und Indien gewonnen werden.
- *Vereinigte Nationen reformieren:* wegen der globalen Klimarisiken sollte eine Mandatsanpassung des Sicherheitsrats erfolgen; das Umweltprogramm UNEP sollte gestärkt und zu einer UN-Sonderorganisation aufgewertet werden.
- *Fragile und schwache Staaten stabilisieren:* u. a. sollte die Entwicklungspolitik und die EU-Sicherheitsstrategie in Richtung auf Krisenprävention erweitert werden, um militärisches Eingreifen so weit wie möglich zu vermeiden.
- *Globales Informations- und Frühwarnsystem ausbauen:* Daten zur regionalen Klimaprognose sollen vor allem für Entwicklungsländer bereitgestellt werden.

Abschlussbericht des Weltklimarates IPCC, Valencia, 16. 11. 2007 [1.34, 1.35]

Die Zusammenfassung des vierten Sachstandsberichts der drei Arbeitsgruppen des Weltklimarates (Wissenschaftliche Grundlagen; Auswirkungen, Anpassung, Verwundbarkeiten; Verminderung des Klimawandels) nennt u. a. folgende Ergebnisse:

- Nur bei einer Beschränkung der Temperaturerhöhung auf weniger als 2,4°C gegenüber dem Niveau von 1850 wird es möglich sein, die schwerwiegendsten Auswirkungen des vom Menschen verursachten Klimawandels zu vermeiden.
- Für eine Stabilisierung auf diesem Niveau muss bis spätestens 2020 der Höhepunkt der weltweiten Treibhausmissionen überschritten und bis 2050 müssen diese 50–65 Prozent gegenüber den Emissionen des Jahres 2000 reduziert sein.
- Die hierfür erforderlichen Technologien sind entweder bereits kommerziell verfügbar oder können bei einer Veränderung der politischen Rahmenbedingungen relativ kurzfristig verfügbar gemacht werden.
- Der Kosten sind deutlich niedriger als dies noch im Bericht des IPCC im Jahr 2001 angenommen wurde. Analysen haben gezeigt, dass die Kosten für eine sehr anspruchsvolle Reduktion der Treibhausgasemissionen in den nächsten Jahren des globale Wachstum um 3 Prozent reduzieren würden, wenn man die positiven Effekte der vermiedenen Klimafolgekosten nicht mit in Betracht zieht.
- Ein erheblicher Teil der Wachstumsverluste kann allein durch die positiven Nebenwirkungen einer solchen Politik ausgeglichen werden.

Perspektiven bis 2050 – Trend- und Klimaschutzszenarien

Bei der Prognose langfristiger Entwicklungen auf dem Energiesektor und speziell für die Nutzung von Erneuerbaren Energieträgern (EE) lassen sich die eher konservativen Trendszenarien, d. h. die plausible Fortschreibung der wesentlichen energieverbrauchsbestimmten Einflussgrößen, und die stärker „visionär“ geprägten Nachhaltigkeitsszenarien, unterscheiden (Abb. 1.7 [1.36, 1.37]):

- Im *Trendszenario* [1.38] wird der Energieverbrauch bis 2010 insgesamt noch zunehmen und trotz einer weiteren Effizienzsteigerung wird die Bruttostromerzeugung bis 2020 um ca. 10 % im Vergleich zu 1998 steigen. Gleichzeitig wächst der Anteil fossiler Energieträger von 85 % auf 91 %, da im Szenario ein Ausstieg aus der Kernenergie mit Kraftwerkslaufzeiten von 35 Jahren angenommen ist. Es werden im Trend weder die CO₂-Minderungsziele noch die Ziele zum Ausbau Erneuerbarer Energieträger erreicht; der Stellenwert von EE im Strommarkt steigt jedoch relativ stark, besonders bei der Windenergie.
- Die *Klimaschutzszenarien*, die den vereinbarten Kernenergieausstieg einbeziehen, gehen davon aus, dass die längerfristigen Ziele nur über verstärkte Maßnahmen zur rationellen Energienutzung und den Ausbau EE erreicht werden können. Bei einer Steigerung der Primärenergieintensität auf 30 % des gegenwärtigen Energieverbrauchs entwickeln sich im HGF-Szenario [1.39] die EE rasch weiter und 65 % an der *Stromerzeugung* werden bis 2050 für möglich gehalten. Im *Wärmemarkt* sind bis 2050 die Potenziale der Biomasse vollständig ausgeschöpft.

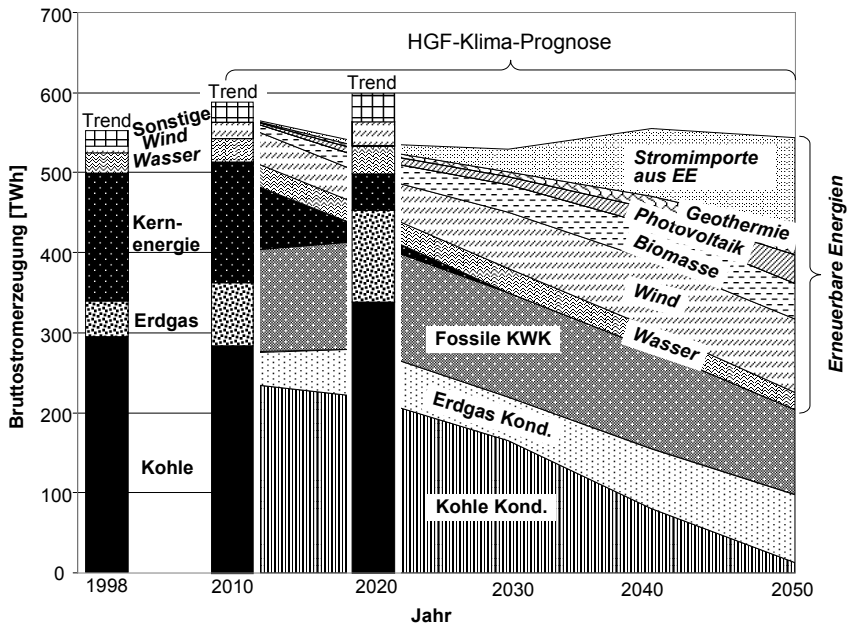


Abb. 1.7 Trendentwicklung der Stromerzeugung in Deutschland nach Prognos AG [1.46] und Klimaschutzszenario nach HGF [1.39]. Nach Daten von Staiß [1.36]

Konventionelle und regenerative Energiequellen (aus: Steger et al. [1.40])

Die dargestellten Daten basieren auf einem Bericht des World Energy Assessment (2000; 2004 update [1.41]) und zielen weniger auf das theoretische Potenzial einzelner Energieressourcen, sondern basieren auf einer Einschätzung darüber, ob in 50 Jahren ein substantieller Anteil des dann zu erwartenden totalen Bedarfs von 600 bis 1000 EJ/Jahr (davon 20–25 % Elektrizität) durch eine bestimmte Ressource abgedeckt werden könnte und was die entsprechenden Implikationen wären.

1. *Fossile Energien*: Betrachtet man die vorhandenen Ressourcen, so wäre es durchaus möglich, dass im Jahre 2050 die fossilen Energien immer noch den größten Beitrag zum globalen Energiesystem liefern. Dies würde allerdings die Erschließung unkonventioneller Öl- und Gasvorkommen und/oder die Rückkehr zur Kohle bedingen.
2. *Kernenergie* (Spaltung, im Prinzip auch Fusion); nicht erneuerbar, aber bei voll ausgebauter Technologie (Wiederaufbereitung, Brüter, schließlich Fusionsreaktor) faktisch unbeschränkt, jedoch nur in einer politisch vollständig kontrollierten Welt anwendbar. Der Kraftwerkpark wäre um das 15- bis 20-fache zu vergrößern, um die Kernenergie zum Hauptträger des zukünftigen Energiesystems zu machen; die Chancen für diese Entwicklung werden als gering eingeschätzt.
3. *Wasserkraft*: erneuerbar, globale Kapazität wäre ökonomisch auf rund 30 EJ/a ausbaubar (heute 9,3 EJ/a), technisch gar auf 50 EJ/a. Die ökologischen Konsequenzen wären allerdings negativ. Ungeeignet in Zukunft die steigende Nachfrage nach Energie signifikant auffangen zu können.
4. *Biomasse*; erneuerbar, Kapazitätsreserven vorhanden (280 bis 450 EJ/a Primärenergie). Sollte Biomasse eine signifikante Rolle (>50 %) bei der Deckung des zukünftigen Energiebedarfs spielen, ergäbe sich ein enormer Landbedarf und eine Konkurrenz mit anderen Landnutzungsarten. Der Mensch nutzt bereits heute 40 % der gesamten terrestrischen Primärproduktion für seine Bedürfnisse.
5. *Windkraft*; erneuerbar, hat im Prinzip ein sehr großes Potenzial. Würden 4 % der für Windkraftwerke geeigneten Standorte genutzt, könnten 230 EJ/a Elektrizität produziert werden.
6. *Photovoltaik*; erneuerbar, praktisch unbeschränktes Potenzial in allen Regionen (Schätzungen zwischen 1.500 und 50.000 EJ/a primär), aber bei den heutigen Energiepreisen noch nicht wirtschaftlich.
7. *Thermische und passive Sonnenenergienutzung*; erneuerbar, praktisch unbeschränktes Potenzial für Energiebedarf auf niedriger Temperaturstufe.
8. *Geothermie*; bedingt erneuerbar, Potenzial immens. Nutzung aus heutiger technischer und ökonomischer Sicht auf Gebiete beschränkt, in denen der geothermische Wärmefluss natürlicherweise an der Erdoberfläche groß ist (Vulkane, Geysire).
9. *Meeresenergie*, z. B. Gezeiten- und Wellenenergie, erneuerbar. Nischenanwendungen, keine signifikante Rolle absehbar.

Aktuelle und künftige Schlüsseltechnologien zur Emissionsminderung

Der Beitrag der Arbeitsgruppe „Verminderung des Klimawandels“ zum Vierten Sachstandsbericht des zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderung (IPCC) von 2007 [1.34] enthält u. a. eine Zusammenstellung von (a) aktuell auf dem Markt befindlichen und (b) bis 2030 auf dem Markt erwarteten Schlüsseltechnologien und -praktiken zur Emissionsminderung¹⁶, nachstehend untergliedert in Sektoren:

Energieversorgung

- a) Erhöhte Versorgung- und Verteilungseffizienz; Brennstoffwechsel von Kohle zu Gas; Kernenergie; erneuerbare Energie; Kraft-Wärme-Kopplung; frühe Anwendung von CO₂-Abtrennung und -speicherung (CCS – *carbon capture and storage*; z. B. Speicherung von aus Erdgas entfernten CO₂)
- b) CO₂-Abtrennung und -speicherung (CCS) für gas-, biomasse- oder kohlebetriebene Stromkraftwerke; weiterentwickelte Kernenergie; weiterentwickelte erneuerbare Energien, incl. Gezeiten- und Wellenkraftwerke, solarthermische Energie (CSP – *concentrating solar power*)

Verkehr

- a) Treibstoffeffizientere Fahrzeuge; Hybridfahrzeuge; saubere Dieselfahrzeuge; Biotreibstoffe; modale Verlagerung von Straßenverkehr auf die Schiene und öffentliche Verkehrssysteme; schnelle öffentliche Verkehrssysteme, nicht-motorisierter Verkehr (Fahrradfahren); Landnutzungs- und Verkehrsplanung)
- b) Biotreibstoffe zweiter Generation; effizientere Flugzeuge; weiterentwickelte Elektro- und Hybridfahrzeuge mit stärkeren und zuverlässigeren Batterien

Gebäude

- a) Effiziente Beleuchtung und Ausnutzung des Tageslichts; effizientere Elektrogeräte und Heiz- und Kühlvorrichtungen; bessere Wärmedämmung; passive und aktive Solararchitektur für Heizung und Kühlung; alternative Kühlflüssigkeiten
- b) Integrale Energiekonzepte für Geschäftsgebäude incl. Technologien wie z. B. Zähler, die Steuerung ermöglichen; in Gebäude integrierte Photovoltaik

Industrie

- a) Effizientere elektrische Endverbraucher-ausrüstung; Wärme- und Stromrückgewinnung; Materialwiederverwertung und -ersatz; Emissionsminderung von Nicht-CO₂-Gasen sowie breites Spektrum an prozessspezifischen Technologien
- b) Weiterentwickelte Energieeffizienz; CCS bei Zement-, Ammoniak- und Eisenherstellung; inerte Elektroden für die Aluminiumherstellung

Landwirtschaft

- a) Verbessertes Management von Acker- und Weideflächen zur Erhöhung der Kohlenstoffspeicherung im Boden; verbesserte Reisanbautechniken sowie Vieh- und Düngemittelmanagement zur Verringerung von Methan-Emissionen; verbesserte Stickstoffdüngung zur Verringerung von N₂O-Emissionen
- b) Verbesserung der Ernteerträge

¹⁶ Nicht-technologische Praktiken in Abschn. 7 der IPCC-AR4-Zusammenfassung [1.42]

Klimaschutz in staatlichen Forschungsprogrammen – Beispiel Deutschland

Die Umweltpolitik und die entsprechende *Forschungsförderung in Deutschland* steht seit der Jahrtausendwende unter dem Leitbild Nachhaltigkeit. Bis 2020 soll in Deutschland die Energie- und Ressourcenproduktivität verdoppelt werden; international soll vor allem zur Lösung der globalen Wasserkrise beigetragen werden. Darüber hinaus wird der Export von innovativen Umweltschutztechnologien sowie der weltweite Verkauf von Ressourcen schonenden Maschinen und Produktionsverfahren als in jedem Sinne nachhaltige Wirtschaftsfaktoren angesehen [1.42].

In dem Rahmenprogramm „Forschung für die Nachhaltigkeit“, das am 30. Juni 2004 vom Bundeskabinett verabschiedet wurde, werden bis 2009 über das BMBF insgesamt 800 Millionen € für die Entwicklung von Innovationen in Wissenschaft und Wirtschaft bereitgestellt, die auf *vier Handlungsfelder* fokussiert sind [1.42]:

1. Konzepte für Nachhaltigkeit in *Industrie und Wirtschaft* (Schwerpunkte: Bauen und Wohnen, Lebensmittelverarbeitung, Mobilität und Verkehr)
2. Nachhaltige Nutzungskonzepte für *Regionen* (urbane Räume, ländliche Räume, sensible Räume)
3. Konzepte für eine nachhaltige Nutzung von *natürlichen Ressourcen* (biologische Ressourcen, Wasser incl. neue Konzepte zum Hochwassermanagement)
4. *Gesellschaftliches Handeln* in Richtung Nachhaltigkeit (Globalisierung, sozial-ökologische Forschung, sozio-demographischer Wandel)

Die Entwicklung der Schwerpunkte der Umweltpolitik und -forschung in Deutschland seit 2001 lässt sich anhand der *Übersichtsveröffentlichungen* des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) verfolgen (www.fona.de):

- Forschung zum globalen Wandel – Wissen für die Zukunft der Erde (2001)
 - Bauen und Wohnen im 21. Jahrhundert – Konzepte für die Zukunft (2002)
 - Herausforderung Klimawandel – Bestandsaufnahme und Perspektiven der Klimaforschung (2003)
 - Nachhaltiges Wirtschaften – Innovationen aus der Umweltforschung (2004)
 - Forschung für den Klimaschutz und Schutz vor Klimawirkungen (2004)
 - Vom Wissen zum Handeln? – die Forschung zum Globalen Wandels und ihre Umsetzung (2004)
 - GLOWA – Globaler Wandel des Wasserkreislaufes (2005)
 - Forschung für die Nachhaltigkeit – Rahmenprogramm des BMBF für eine zukunftsfähig innovative Gesellschaft (2005)
 - Nachhaltige Ver- und Entsorgung – Impulse aus der sozial-ökologischen Forschung (2006)
 - KlimaZwei – Forschung für den Klimaschutz und Schutz vor Klimawirkungen (2007)
 - Die Hightech-Strategie zum Klimaschutz – 2. Klima-Forschungsgipfel (2007)
- Für die integrierte Energie- und Klimapolitik stehen im Bundeshaushalt 2008 für Klimaschutzmaßnahmen insgesamt 3,3 Mrd. € zur Verfügung; darin enthalten sind bis zu 400 Mio. € aus der Veräußerung von Emissionszertifikaten sowie rund 700 Mio. € aus der bilateralen und multilateralen Entwicklungszusammenarbeit [1.43].

Lernkurven im Bereich der Erneuerbaren Energien

Für die Abschätzung der mittelfristig erreichbaren Kosten bei innovativen Technologien wie den meisten regenerativen Energietechniken (REG) hat sich das Instrument der „Lern- bzw. Erfahrungskurven“ bewährt [1.44, 1.45]. Dabei werden die Herstellungskosten eines in größeren Stückzahlen, standardisierbaren Produkts mit der kumulierten Produktionsmenge verknüpft; dies trifft für einheitliche Komponenten von REG-Technologien zu, wie Module, Kollektoren, Speicher, aber auch für komplette Konverter (z. B. Wind; Brennstoffzelle). Typische Einflüsse auf eine Lernkurve zeigt die Entwicklung der Photovoltaik-Module in Abb. 1.8 [1.46]. Beispiele für Lernkurven gibt die Studie „Erneuerbare aus und in Österreich“ [1.47].

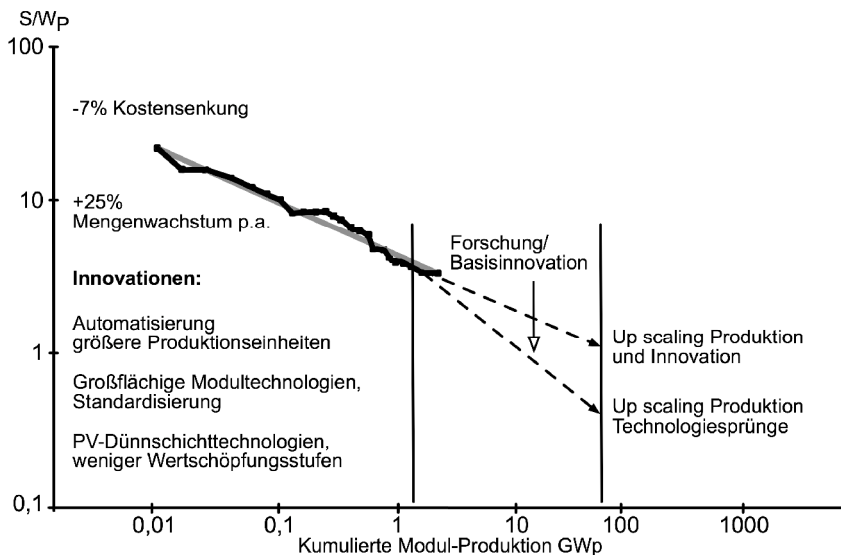


Abb. 1.8 Lernkurve am Beispiel Photovoltaik-Modulpreise 1973 bis heute (Schott [1.46] nach Daten von Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme)

„Lernen am Markt“ [1.46] beschreibt mit der Photovoltaik exemplarisch die strategische Rolle von anwendungsnaher Forschung bei der Entwicklung einer nachhaltigen Energieversorgung bis zum Jahr 2050:

- Nur mit Wachstum lässt sich ein industrieller Lerneffekt erzielen
 - Das Wachstum darf aber nicht zu hoch sein, weil dann diese Lerneffekte nicht mehr ausreichend in die Neuinvestitionen für die Produktionstechnik einfließen.
- Das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG [1.48, 1.49]) hat sich als Motor bewährt:
- es schafft Finanzierungs-Sicherheit durch gesicherte Erträge für den Betreiber
 - die Vorgabe der stetigen Degression der Einspeisevergütung drückt die Kosten
 - damit wird ein hoher Druck erzeugt, Innovationen zeitnahe umzusetzen
- Das Erneuerbare Energie-Gesetz bietet frühe Investitionsanreize; die „industrielle Dividende“ kommt früher, wenn die Anbieter für den Export gerüstet sind.

Kontroversen über die Instrumente zur Förderung erneuerbarer Energien

Während das Ziel einer verstärkten Förderung erneuerbarer Energien unumstritten ist, ergeben sich bei der praktischen Umsetzung durchaus Kontroversen, wie die folgenden Beispiele mit Beteiligung hochrangiger Fachgutachtergremien zeigen:

„Nach der Implementierung eines funktionierenden Marktes für CO₂-Emissions-Lizenzen in Europa wird der Gesamteffekt des Erneuerbare-Energien-Gesetzes auf die Reduktion von CO₂-Emissionen gleich Null sein; es wird dann zu einem ökologisch nutzlosen, aber volkswirtschaftlich teuren Instrument und müsste konsequenterweise abgeschafft werden“ (Schlussfolgerung der Stellungnahme des Wissenschaftlichen Beirats beim Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit „Zur Förderung erneuerbarer Energien“ [1.50], vor der Beratung im Deutschen Bundestag zur Neuregelung des Rechts der Erneuerbaren Energien im Strombereich (2004).

Als Begründung werden die grundsätzlichen Unterschiede der beiden Instrumente für die Erreichung von globalen und nationalen Klimaschutzziele genannt: (1) Sinn des *Lizenzmarktes* ist es, ein Preissignal für CO₂-Emissionen zu erhalten und dafür zu sorgen, dass die Einsparung dieser Emissionen auf volkswirtschaftlich möglichst kostengünstige Weise geschieht. (2) Bei den *Einspeisevergütungen nach dem Erneuerbare-Energie-Gesetz* wird angenommen, dass der Betreiber der Wind-Strom-Anlage oder Solar-Strom-Anlage sein Angebot bis zu dem Punkt ausdehnt, bei dem seine Grenzkosten mit der Einspeisevergütung übereinstimmen. Nach Ansicht des Beirats [1.50] sollten die Prioritäten beim Einsatz von Mitteln zur CO₂-Minderung einerseits bei der forcierten Modernisierung des Kraftwerks-parks in Deutschland und andererseits bei EU-weiten Maßnahmen des „Clean-Development-Mechanism“, z. B. an chinesischen Kohle-Kraftwerken, liegen.

„Die Förderung von Biomasse kann grundsätzlich einen jeweils unterschiedlichen Beitrag zur Erreichung agrar-, energie- und umweltpolitischer Ziele leisten. Dabei ist aber auch auf die Kosten und die Konflikte zwischen diesen Zielen zu achten. Gerade wenn mehrere Ziele gleichzeitig verfolgt werden können, sollte im Zweifel dem Klimaschutz auf der Grundlage eines naturverträglichen Anbaus Vorrang eingeräumt werden. Während eine priorisierte Förderung des Einsatzes von Biomasse im Transportsektor (Biokraftstoffe) die Potenziale der Biomasse hinsichtlich des Klimaschutzziels nicht optimal nutzt, zeigt der stationäre Einsatz vor allem bei der Wärmenutzung sowie bei kombinierter Wärme- und Stromnutzung gute Treibhausgas-Einsparpotenziale“ (Sondergutachten des Sachverständigenrats für Umweltfragen „Klimaschutz durch Biomasse“, Juli 2007 [1.51]).

Eine nachhaltige Biomasseförderungsstrategie muss nach Auffassung des Sachverständigenrats zwei grundlegende Anforderungen erfüllen [1.51]:

1. Optimierung der Biomassenutzung bei der Vermeidung von Treibhausgas-Emissionen; einerseits ist sie am wirksamsten bei der Wärmeproduktion, andererseits ist sie z.Zt. die einzige regenerative Energiequelle für Kraftstoffe.
2. Entwicklung eines nationalen und internationalen Ordnungsrahmens für den umweltgerechten Anbau von Energiepflanzen. Dieser Ordnungsrahmen muss die generellen Instrumente für eine umweltgerechte Landwirtschaft einbeziehen.

Ausgewählte sektorale Instrumente – IPCC Sachstandsbericht [1.34]

Der Beitrag der Arbeitsgruppe „Verminderung des Klimawandels“ zum Vierten Sachstandsbericht des zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderung (IPCC) von 2007, der bereits im Hinblick auf die künftig erwarteten Schlüsseltechnologien zitiert wurde, gibt eine Zusammenstellung von Politiken, Maßnahmen und Instrumenten, die sich im jeweiligen Sektor in mindestens einigen nationalen Fällen als umweltwirksam erwiesen haben (in Klammern: wesentliche Einschränkungen oder Möglichkeiten):

Energieversorgung

Verringerung von Subventionen für fossile Brennstoffe, Steuern oder Kohlendioxidabgaben auf fossile Brennstoffe (Widerstand durch Interessensgruppen aufgrund bestehender Rechte könnte die Umsetzung erschweren); Einspeisevergütungen für Erneuerbare-Energien-Technologien, Quoten für Erneuerbare Energien, Subventionen für Produzenten (könnten angemessen sein, um Märkte für Niedrigemissionstechnologien zu schaffen).

Verkehr

Verpflichtende Standards für Treibhausverbrauch, Biotreibstoffbeimischung und CO₂-Standards für den Straßenverkehr (unvollständige Erfassung der Fahrzeugflotte kann die Effektivität begrenzen); Steuern auf Fahrzeugkauf, Zulassung, Nutzung und Treibstoffe, Straßen- und Parkgebühren (Effektivität kann mit höheren Einkommen sinken); Mobilitätsbedürfnisse durch Flächennutzungsregelungen und Infrastrukturplanung beeinflussen, Investitionen in attraktive öffentliche Verkehrssysteme und nicht-motorische Verkehrsformen (besonders geeignet für Länder, die gerade ihre Verkehrssysteme aufbauen).

Gebäude

Gerätestandards und Kennzeichnung, Gebäudestandards und Zertifizierung, Programme zur Nachfragesteuerung, Vorbildfunktion der öffentlichen Hand, Anreize für Energiedienstleistungsunternehmen (regelmäßige Überarbeitung der Standards nötig, attraktiv für neue Gebäude, Durchsetzung kann schwierig sein, Regulierung notwendig, so dass Versorgungsunternehmen profitieren können, Regierungseinkäufe können die Nachfrage nach energieeffizienten Produkten steigern, Erfolgskriterium: Zugang zu Drittmitteln).

Industrie

Bereitstellung von Informationen für einen Leistungsvergleich, Leistungsstandards, Subventionen, Steuervergünstigungen (können angebracht sein, um die Etablierung der Technologien anzuregen; Beständigkeit der nationalen Politik ist wichtig im Hinblick auf internationale Wettbewerbsfähigkeit); handelbare Zertifikate (vorhersehbare Zuteilungsmechanismen und stabile Preissignale sind wichtig für Investitionen); freiwillige Vereinbarungen (Erfolgskriterien sind unter anderem: klare Ziele, ein Referenzszenario, Einbeziehung Dritter in Entwurf und Begutachtung und formelle Überwachungsmaßnahmen, enge Zusammenarbeit zwischen Regierung und Industrie).

EU-Klimapaket vom 23.01.08 mit Entwürfen für neue Rechtsakte [1.52, 1.53]*1. Reduzierung der Treibhausgase in den einzelnen Mitgliedsstaaten [1.54]*

EU-weit sollen die Treibhausgas-Emissionen bis 2020 um 20 % gegenüber 2005 abnehmen (Industrie und Energieunternehmen – 21 %; Haushalte, Verkehr und Dienstleistungen – 10 %). Der Verteilungsschlüssel ist an der Wirtschaftskraft orientiert: Deutschland soll für die nicht in den Emissionshandel einbezogenen Sektoren – Verkehr, Haushalte, Landwirtschaft, Abfall – um 14 % senken.

2. Förderung der erneuerbaren Energien [1.55]

EU-weit soll der Anteil von Wind-, Wasser- und anderen regenerativen Energien am Endenergieverbrauch bis zum Jahr 2020 auf insgesamt 20 % ansteigen. Für die nationalen Quoten wird jeweils der bisherige Anstieg zwischen 2001 und 2005 berücksichtigt. Hinzu kommen 5,5 % und ein Faktor aus Pro-Kopf-Bruttoinlandsprodukt und Einwohnerzahl. Für Deutschland heißt dies eine Steigerung von rund 6 % auf 18 % bis zum Jahr 2020.

Für alle Mitgliedsstaaten gilt pauschal die im März 2007 beschlossene Biokraftstoff-Quote von 10 %. Für die Stoffe werden Nachhaltigkeitskriterien eingeführt, um den umweltschonenden Anbau zu sichern; außerdem sollen die Biokraftstoffe ein Mindestniveau an Netto-CO₂-Einsparung einhalten.

Der Handel von Zertifikaten für erneuerbare Energien (so genannte Öko-Zertifikate) auf Unternehmensebene steht unter Genehmigungsvorbehalt der Mitgliedsstaaten. Dies gilt insbesondere dann, wenn Transfers ins Ausland die Einhaltung der nationalen Ausbauziele gefährden. Deutschland hat sich für diese Lösung stark gemacht, da ein solcher Handel die Ausbauziele des Erneuerbare-Energien-Gesetzes konterkariert.

3. Weiterentwicklung des Emissionshandels [1.56]

Die EU-Kommission will eine einheitliche Gesamtmenge (Cap) für den Emissionshandel in alle Mitgliedsstaaten festlegen. Auch die Zuteilungsregeln für die Anlagentypen werden harmonisiert:

- Ab 2013 sollen alle Zertifikate für stromerzeugende Anlagen in Auktionen verkauft werden.
- Für die stromverwertende Industrie soll der Anteil der zu ersteigernden Zertifikate bei 20 Prozent eingeführt und stufenweise bis 2020 erhöht werden.
- Für energieintensive Unternehmen wie zum Beispiel Stahl-, Aluminium-, Glas- und Chemieunternehmen will die EU-Kommission Ausnahmen schaffen.
- Der Flugverkehr wird einbezogen.

Kosten und Umsetzung

Die EU-Kommission geht von direkten Kosten in Höhe von 0,5 % des Bruttoinlandsproduktes im Jahre 2020 aus, die das Paket entstehen. Aufgrund von CO₂-Zertifikaten, die durch Klimaschutzprojekte nach dem Kyoto-Protokoll im Ausland erworben werden, könnte der Wert niedriger ausfallen. Das Paket soll spätestens bis 2010 verabschiedet werden.

1.2 Ökologische Grundlagen

Es spricht vieles dafür, dass die Umweltkrisen durch eine falsche oder nicht angemessene *Denkweise* hervorgerufen werden. Nach den klassischen Experimenten von Dörner und Mitarbeitern [1.57], bei denen Versuchspersonen in die Rolle von landwirtschaftlich-technischen Beratern einer fiktiven afrikanischen Region „Tanaland“ versetzt wurden, scheint erwiesen, dass der Denkapparat vieler Menschen außerstande ist, Problemstellungen innerhalb vernetzter Systeme von Ökonomie und Ökologie zu bewältigen. Die starke Gewichtung des jeweils zuletzt wahrgenommenen Inhalts, das bevorzugte Vergessen neutraler Inhalte gegenüber emotional positiv und negativ gefärbten Eindrücken machen das menschliche Gedächtnis zu einer sehr schlechten Basis für den Umgang mit sog. „nicht stationären zeitlichen Abläufen“. Das frühe Beispiel des Assuanstaudamms hatte bereits gezeigt, wie schwierig es ist, bei einem technischen Großprojekt die negativen Folgen für die Umwelt abzuschätzen.

Die neue Sicht der Wirklichkeit beruht auf der Erkenntnis, dass alle Phänomene – physikalische, biologische, psychische, gesellschaftliche und kulturelle – grundsätzlich miteinander verbunden und voneinander abhängig sind. An die Stelle isolierter Kausalketten zu denken, tritt das *Denkmodell dynamisch vernetzter Systeme* [1.58], die sich selbst regulieren.

„Ökologie“ ist die Lehre vom Haushalt der Natur, erweitert „das Studium von Struktur und Funktion der Natur“, und in der umfassendsten Definition „die Wissenschaft von den Wechselbeziehungen zwischen den Organismen untereinander, zu ihrer Umwelt und deren Geoökofaktoren (Klima, Wasser, Boden, Relief)“ [1.59]. Die „neue Ökologie“ versucht der „Ganzheitlichkeit“ in Wissenschaft und Technik größere Aufmerksamkeit zu schenken (*Kasten* S. 25). Der Begriff „Ökologie“ beschreibt heute kein definiertes Fachgebiet mehr, sondern umfasst ein Konglomerat von Problemfeldern zum Gegenstand Umwelt [1.60].

1.2.1 Struktur von Ökosystemen

Die Ökologie ist wiederum nur ein Teil eines übergreifenden Natursystems, in dem stoffliche, energetische und informationelle Prozesse stattfinden (Tabelle 1.5). Mit der Einführung des Begriffs „Ökosysteme“ wurde es populär, derartige Systeme durch *Energieflüsse* zu beschreiben. Für die Synergetik, die den energetischen Austausch innerhalb verschiedener Strukturniveaus untersucht, ist die ökologische Grundlagenforschung mit ihren Modellen besonderes wichtig; diese tragen viel zum Verständnis des Ordnungsauf- oder -abbaus in technischen Systemen bei.

Unter dem Begriff „Struktur“ ist die Gesamtheit der Art und Menge der Elemente eines Systems sowie der zwischen den Elementen eines Systems bestehenden Kopplungen zu verstehen. Auf Grund der großen Vielfalt der biotischen und abiotischen Elemente und der großen Zahl der möglichen Zustände zwischen diesen Elementen sind Ökosysteme sehr komplex. Deshalb ist ihr Verhalten schwer voraussagbar; dazu tragen *Eigenschaften der Ökosysteme* bei (Lange in [1.61]):

Tabelle 1.5 Übersicht über die verschiedenen Formen des Austauschs zwischen Systemen (nach Herlitzius und Töpfer in [1.61])

	Stoffliche Prozesse	energetische Prozesse	Informationelle Prozesse (Träger)
<i>präbiotischer Bereich</i>	Passiver Transport (mechanische Stoffbewegung, Diffusion, Ionen- und Elektrenttransport u. a.)	passiver Energieausgleich (potentielle + kinetische Energie)	Entstehung höherer Ordnung (Plasmazustände, dissipative Strukturen)
<i>Lebensprozesse</i>	aktiver Transport (Bewegung der Organismen, Stoffwechsel, Kreislauf, Wassertransport)	Photosynthese, Muskel, ATP als spezifischer Energieträger, Fettzelle, Chlorophyll	informationelle Prozesse in Lebewesen sowie zwischen Lebewesen und Umwelt
<i>technische und gesellschaftliche Prozesse</i>	Güter- und Personentransport, betrieblicher Materialfluss	Elektroenergieversorgung und -nutzung, Raumwärme, Stadtgas, Vergaser- und Dieselmotoren	Kommunikation, Nachrichtenwesen, kollektive Erfahrung und kollektives Wissen, Steuerung und Regelung von Prozessen

- die stoffliche, energetische und informationelle Offenheit,
- die räumliche Heterogenität und zeitliche Variabilität des Systemzustands,
- die Kooperativität der physikalischen, chemischen und biologischen Prozesse,
- das vor allem in Entwicklungsprozessen ausgeprägte nichtlineare Verhalten und die zeitliche Trägheit,
- die Abhängigkeit der Veränderung des Systemzustands von den zeitlich vorangegangenen Zuständen.

Die *thermodynamischen Gesetzmäßigkeiten*, vor allem die Gleichgewichte, können dazu nur den Rahmen des Möglichen abstecken.

1.2.2 Stabilität von Ökosystemen und technischen Systemen

Natürlich funktionierende Systeme in der Landschaft oder in den Gewässern und technisch-ökonomische Systeme in der modernen Industriegesellschaft haben eine Reihe von Grundmerkmalen gemeinsam – z. T. freilich nur formale Analogien. In der Tabelle 1.6 (nach Weigmann [1.62]) sind Beispiele für ein ökologisches System (Wald) und für ein ökonomisches System (Stahlwerk) gegenübergestellt.

Die *funktionelle Geschlossenheit* von natürlichen Ökosystemen bewirkt ein hohes Maß von internen Rück- und Nebenwirkungen, die eine komplex regulierte, dynamische Stabilisierung zur Folge haben. Der Zwang zur effizienten Nutzung vorhandener Stoffe und Energiemengen führt letztlich zu Stoffkreisläufen, zu „natürlichem Recycling“, und bedeutet für die Umgebung des Systems ein Minimum an möglichen Belastungen durch Stoff- und Energieaustrag. Im Gegensatz zu die-

ser natürlichen Funktionsweise sollen vom Menschen genutzte Ökosysteme, wie Forst und Acker, nicht ein funktionelles Gleichgewicht erreichen, sondern möglichst hohe Mengen an Ernte hervorbringen. Man muss deshalb *Zusatzenergie und stoffliche Zusätze* in Form von Düngemitteln aufwenden, um über technische Regelung das System an der natürlichen Entwicklung hin zu einem stabilen System zu hindern.

Tabelle 1.6 Merkmalsanalogien partiell offener Systeme. Aus: Weigmann [1.62]

	Ökosystem Wald	Industriesystem (Stahlwerk)
<i>Systemteile</i>		
... unbelebt	Boden, Wasser, Luft	Gebäude, Maschinen, Verkehrswege
... belebt	Organismen	Arbeitskräfte
<i>Ressourcen</i>		
... von außen	Sonnenenergie, Wasser, O ₂ , CO ₂	Brennstoffenergie, Rohstoffe, Luft, Wasser
... von innen	Depotstoffe des Bodens (Mineralstoffe, Streu, Humus), Organismen	Lagerdepots
<i>Funktionen</i>		
verteilt auf Subsysteme	Baum-, Kraut-, Bodenschicht mit verschiedenen Organismen	Direktion, Verwaltung, Produktion, Verkauf, Einkauf
Steuerungsmechanismen	Wechselwirkung von Organismen	Planung, Organisation
... intern	Nahrungsbeziehungen, Konkurrenz u. a.	Prozess-Steuerung, Management u. a.
... extern	Sonne, Klima, Wirkung aus Nachbarsystemen	Wirtschafts-, Finanzpolitik, Rohstoffpolitik, Nachfrage
<i>Ziele</i>		
	System-Selbsterhaltung durch Optimieren der Wechselbeziehungen u. Ressourcennutzung	Systemerhaltung durch Steigerung von Produktion, Umsatz, Kapitalertrag
	<i>Stabilität</i>	<i>Expansion</i>

Dieser Vergleich von ökologischen und technischen Systemen zeigt, dass auch aus wirtschaftlichen Gründen die folgenden *ökologischen Systemprinzipien* stärker beachtet werden müssen [1.40]: (1) Begrenzttes Wachstum von Systemteilen und Prozessen; (2) bessere Energieausnutzung, Minimierung von Energiezu- und -abfuhr; (3) Förderung von Stoffrecycling, Minimierung von Stoffausfuhr als Abfall technischer Prozesse; (4) Verstärkung von regelnden Wechselwirkungen zwecks Harmonisierung der Systemprozesse; (5) Einführen von rückkoppelnden, stabilisierenden Mechanismen zwischen ökonomischen Systemen im Verbund (sektoral, regional, international).

Gekoppelte Kreislaufprozesse: Die Erde als Wärmemaschine [1.63, 1.64]

Die Erde bezieht aus dem kontinuierlich anfallenden Sonnenlicht die Energie, um Winde, Meeresströmungen, Kreisläufe des Wassers, der Gesteine, der Elemente und des Lebens anzutreiben. Abbildung 1.9 [1.64] zeigt oben links ein Transmissionsystem, das die Kreisläufe der für das Leben notwendigen Elemente symbolisiert; diese Kreisläufe werden durch die Biomasse synchronisiert.

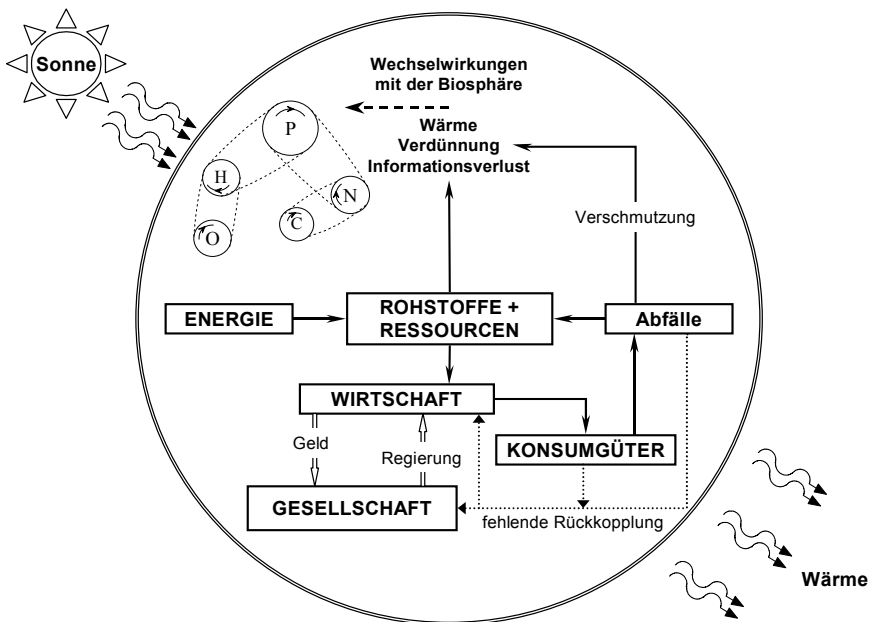


Abb. 1.9 Die Überlagerung der Ökosphäre durch die Zivilisationsmaschine [1.64]

Die Ökosphäre wird von der vom Menschen betriebenen „Zivilisationsmaschine“ überlagert. Mit Hilfe von Energie aus dem Innern des Systems besteht die zivilisatorische und technische Tätigkeit des Menschen darin, Rohstoffe aus der natürlichen Umwelt aufzunehmen, umzuformen oder umzuwandeln. Der größte Teil der Güter wird im Laufe der Bearbeitung als Abfall der Natur wieder zurückgegeben. Meist werden dabei die natürlichen Kreisläufe verändert. Beschleunigen wir beispielsweise den Phosphorkreislauf durch progressive Ausbeute von phosphorhaltigen Mineralien und durch deren Eintrag in die Seen, wird der ganze Umsatz im Ökosystem erhöht, d. h. alle Räder in Abb. 1.9 drehen sich schneller. Dies kann ggf. schließlich zum Zusammenbruch des Systems führen, z. B. zum „Umkippen“ eines Sees aufgrund einer Überlastung des Sauerstoffhaushalts, nachdem zuvor ein exzessives Algenwachstum durch die erhöhten Phosphoreinträge stimuliert wurde.