



Forschungsinstitut für
anwendungsorientierte
Wissensverarbeitung/n
Lehrstuhl für Informatik
an der Universität Ulm



Lernen und Handeln für unsere Zukunft

Beiträge zur Strategie

CO₂-neutrale Landesverwaltung Hessen

**Forschungsinstitut für anwendungsorientierte
Wissensverarbeitung/n
(FAW/n)**

**T. Kämpke
F.J. Radermacher
mit Unterstützung von
M. Gerth und D. Solte**

22.3.2011

Forschungsinstitut für anwendungsorientierte Wissensverarbeitung/n FAW/n
Lise-Meitner-Str. 9
89081 Ulm

info@faw-neu-ulm.de

www.faw-neu-ulm.de

Diese Untersuchung ist entstanden als Beauftragung durch das Hessische Ministerium der Finanzen im Rahmen der Strategie **CO₂-neutrale Landesverwaltung Hessen**. Es erfolgten intensive Absprachen mit und Unterstützung durch Herrn Hans-Ulrich Hartwig (Referatsleiter, Hess. Ministerium der Finanzen), Herrn Peter Eichler (Hess. Baumanagement), Frau Kornelia Helbig (Hess. Ministerium der Finanzen) und Herrn Peter Caratiola (Hess. Ministerium der Finanzen).

Stand

März 2011.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	5
0. Einordnung	8
0.1 Vorgenommene Abgrenzungen	8
0.2 Umfang und Lokalisierung zu betrachtender CO ₂ -Emissionen	8
1. Zu Reduktion	11
1.1 Hintergrund	11
1.2 Situation Hessische Landesverwaltung	18
1.2.1 Reduktionsabschätzungen auf Basis von Durchschnittsverbräuchen und gleich bleibendem Strommix.....	21
1.2.2 Reduktionsabschätzungen auf Basis von gebäudeabhängigen Verbräuchen und gleich bleibendem Strommix	22
1.3 Aktuelle Detailanalyse von Emissionsdaten.....	24
1.4 Optimierungsansätze zur Prioritätensetzung für CO ₂ Reduktion bei Bauten; Emissionsminimierung bei vorgegebenen Maximalkosten	25
2. Zu Substitution	27
2.1 Hintergrund	27
2.2 Situation Hessische Landesverwaltung	30
2.3 Weiterer Aspekt	33
3. Zu Kompensation	35
3.1 Hintergrund	35
3.2 Sind Zertifikate überhaupt wirksam?	37
(1) Renewable Energy Certificates.....	37
(2) EU-Zertifikate	38
(3) Clean Development Mechanismus	39
(4) Aufforstungsprojekte und echte Klimaneutralität.....	40
(5) UN-Zertifikate und echte Klimaneutralität	42
(6) Wer trägt im Rahmen von Klimaneutralität die Kosten?.....	43
(7) Weitere CO ₂ -Neutralisierungsangebote	43
3.3 Situation Hess. Landesverwaltung.....	45
3.4 Empfehlung.....	46
4. Ausblick	48
Anhang A	49
Anhang B	52
Quellen	57
Autoren	61

Zusammenfassung

Das Land Hessen unternimmt mit dem Projekt „CO₂-neutrale Landesverwaltung Hessen“ eine freiwillige Anstrengung, zum Klimaschutz sichtbar und über die gesetzlichen Anforderungen hinausgehend beizutragen. Das Projekt kommt von einer ersten Analyse her zu einer Konzentration auf die Thematik der von der Landesverwaltung genutzten Gebäude und der damit verbundenen Aufwendungen im energetischen Bereich für Strom, Wärme etc. Hier werden entscheidende Ansatzpunkte zur CO₂-Reduktion identifiziert. Sie fallen in den großen Komplex der entsprechenden Erwartungen an den Gebäudesektor und sind konfrontiert mit erheblichen finanziellen Herausforderungen, insbesondere in Zeiten enger öffentlicher Finanzen.

Die Entscheidungsträger in Hessen haben eine konsequente dreistufige Herangehensweise gewählt. Es wird versucht, den Energieverbrauch zu reduzieren und den verbleibenden Energieverbrauch möglichst klimaneutral zu substituieren. Da, wo sich dies kostenmäßig nicht darstellen lässt, wird der Weg der Kompensation gewählt.

Das Projekt ist vielschichtig, bindet eine große Zahl von vielen Partnern ein und ist eingebettet in das größere Umfeld der Nachhaltigkeitsstrategie des Landes Hessen. Die Herausforderungen bestehen unter anderem in Abgrenzungsfragen bezüglich induzierter CO₂-Emissionen. Was ist zu berücksichtigen und was nicht, z. B. die allgemeine Lebenssituation der Mitarbeiter (nein), Dienstreisen der Mitarbeiter (ja)? Die Bilanzierung der Aufwendungen energetischer Art und die resultierenden Klimaeffekte, im Besonderen da, wo Mitarbeiter oder (im Rahmen von Outsourcing-Vorgängen) Dritte als „Nutzer“ von Gebäuden involviert sind, wirft vielfältige Fragen auf, und das gilt auch für die Abschätzung von Einsparmöglichkeiten, z. B. im Bereich Reduktion oder die Klimaeffekte im Bereich Substitution.

Deutlich wird, dass die Kosten zur Erreichung energetischer Verbesserungen in der Regel hoch sind und dass in vielen Fällen die absehbaren Einsparungen

heute die entsprechenden Investitionen nicht ermöglichen bzw. finanzieren. Häufig ist es so, dass sich in Form von Kompensation eine preiswertere Alternative anbietet, allerdings wirft dieser Weg ethische Fragen auf, ob dieses angemessen ist. Ferner stellen sich Fragen nach der Qualität angebotener Zertifikate: Handelt es sich um ein „Green Washing“, wird eine echte Reduktion von CO₂-Emissionen erreicht, drohen Phänomene eines Carbon Leakage und wie würde man sich ein Umfeld wünschen, in dem all dieses ethisch und von der Sache her angemessen positioniert werden kann?

Das FAW/n hat versucht, die aus der Wechselwirkung mit dem Club of Rome resultierende globale Orientierung konsequent einzubringen. Dies gilt auch für die von der Wechselwirkung mit der Global Marshall Plan Initiative her kommende soziale Dimension im internationalen Kontext und die aus unserer Arbeit im Ökosozialen Forum Europa resultierende europäische Orientierung. Eingeflossen sind ferner die Erfahrungen aus den beiden größeren Projekten „Nachhaltigkeitspositionierung für die deutsche Immobilienwirtschaft“ mit dem Arbeitskreis „Nachhaltigkeit“ des Zentralen Immobilienausschusses e. V. (ZIA) und „Die soziale Dimension des Klimaschutzes und der Energieeffizienz im Kontext von Bau- und Wohnwirtschaft“ mit dem Bundesverband deutscher Wohnungs- und Immobilienunternehmen (GdW), Berlin. Ebenso gingen Erkenntnisse aus der größeren FAW/n-Analyse „Klimapolitik nach Kopenhagen – Umsetzung der neuen Potentiale“ ein.

Bottomline der vom FAW/n vertretenen und vorgeschlagenen Linie ist ein doppelstrategischer Ansatz. Jenseits aller Kostenüberlegungen und der globalen Herausforderungen müssen wir vor Ort etwas tun, um zu zeigen, dass es geht, um zu zeigen, dass wir bereit sind, etwas zu tun, um die Menschen zu motivieren und sie mitzunehmen und damit zugleich auch neue Technologien zu finden. Wie viel wir dabei tun und wie viel wir finanziell tun können, ist in manchem eine politische Entscheidung, denn rein rechnerisch sind die internationalen Ansätze im Bereich Kompensation in der Regel preisgünstiger und wirksamer, aber eine alleinige Beschränkung auf diese lässt sich auch unter ethischen Aspekten nicht begründen.

Die Empfehlung geht dahin, mit Blick auf die vorhandenen Mittel, mit Blick darauf, dass die globale Seite heute vielleicht zu wenig kommuniziert wird, und mit Blick auf den 20-jährigen Zeithorizont des Projektes, mehr als die Hälfte der erforderlichen CO₂-Senkungen durch Kompensation anzustreben; andererseits aber mehr als ein Drittel und in Richtung von 50 Prozent vor Ort durch Reduktions- und Substitutionsmaßnahmen zu erreichen. Die jeweiligen Maßnahmen sind unter Effizienz- und Kommunikationsaspekten klug auszuwählen. Hier ist im Projekt vieles passiert. Der vorliegende Bericht beleuchtet eine Reihe wesentlicher Aspekte.

Wir freuen uns, in diesem Projekt beteiligt gewesen zu sein und wünschen allen Beteiligten und der Initiative als solcher eine hohe Wirksamkeit, gerade auch in der Vermittlung der Thematik in Richtung auf die Bürger.

0. Einordnung

Das Land Hessen verfolgt das Ziel, bis zum Jahr 2030 die CO₂-Neutralität der Landesverwaltung sicherzustellen. Das Forschungsinstitut für anwendungsorientierte Wissensverarbeitung/n (FAW/n), Ulm unterstützt die Arbeiten. Die im Folgenden dargestellte Strategie ist das Ergebnis der wechselseitigen Überlegungen.

0.1 Vorgenommene Abgrenzungen

1. Beschränkung auf CO₂-Emissionen / keine anderen Klimagase.
2. keine anteilige befreiende Zurechnung eines als „neutral“ bzw. als Menschenrecht akzeptierten Basisemissionsvolumens pro Bürger oder Mitarbeiter.
3. keine Anlastung von anteiligen CO₂-Emissionen aus Vorprozessen (Errichtung genutzter Gebäude, Produktion verwendeter Geräte etc.).
4. keine Anlastung von Emissionen, die mit Leben und Lebensstil der Mitarbeiter des Landes verbunden sind.
5. Keine Anlastung von CO₂-Emissionen in Verbindung mit Pendlerbewegungen von Mitarbeitern des Landes.

0.2 Umfang und Lokalisierung zu betrachtender CO₂-Emissionen

Aufgrund der mittlerweile erstellten, ersten CO₂-Bilanz („Eröffnungsbilanz“) für die Landesverwaltung Hessen gelten die folgende Eckwerte und Systemabgrenzungen, vgl. [FCC].

1. Nach Abgrenzung fallen bei der Landesverwaltung etwa 450 000 t CO₂-Emissionen pro Jahr an; hiervon der überwiegende Anteil für Gebäude

sowie knapp 50 000 t nach konservativer Schätzung aus Mobilität mit eigenen und fremden Verkehrsmitteln.

2. In Landesgebäuden, d. h. eigenen und gemieteten Liegenschaften sowie Hochschulen und Universitäten, fallen pro Jahr ca. 400 000 t CO₂-Emissionen an, davon ca. 185 000 t für die Erzeugung von Wärme inkl. Kälte/Klimatisierung und ca. 215 000 t für die Nutzung von Strom.
3. Strom geht (neben Wärmeerzeugung) in den Betrieb von Geräten (Beleuchtung, Rechner) und Kommunikationsgeräten verschiedener Art sowie von Spezialgeräten.
4. Emissionen in Verbindung mit Dienstfahrten, Einsätzen mit landeseigenen Fahrzeugen oder Dienstreisen mit nichtlandeseigenen Verkehrsmitteln werden einbezogen.
5. Betrieb der Universitäten wird eingeschlossen. Dabei berücksichtigt sind Kantinen (Mensen).
6. Betrachtete Emissionen betreffen Aktivitäten der Landesverwaltung, anteilig Private Public Partnerships und fremdbezogene Volumina (Outsourcing).

Die gewählte Strategie verfolgt die Priorität

1. Reduktion (Effizienzsteigerung),
2. Substitution,
3. Kompensation.

CO₂-Belastung ist ein globales Problem, denn die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre ist zwar jahreszeitlichen Schwankungen unterworfen aber zu jedem Zeitpunkt überall ungefähr gleich groß, und zwar weitgehend unabhängig von den Emissionsorten. Dies zeigt Abbildung 0.1. Die maximale Schwankung der CO₂-Konzentration in 8 km Höhe liegt bei ca. 3%.

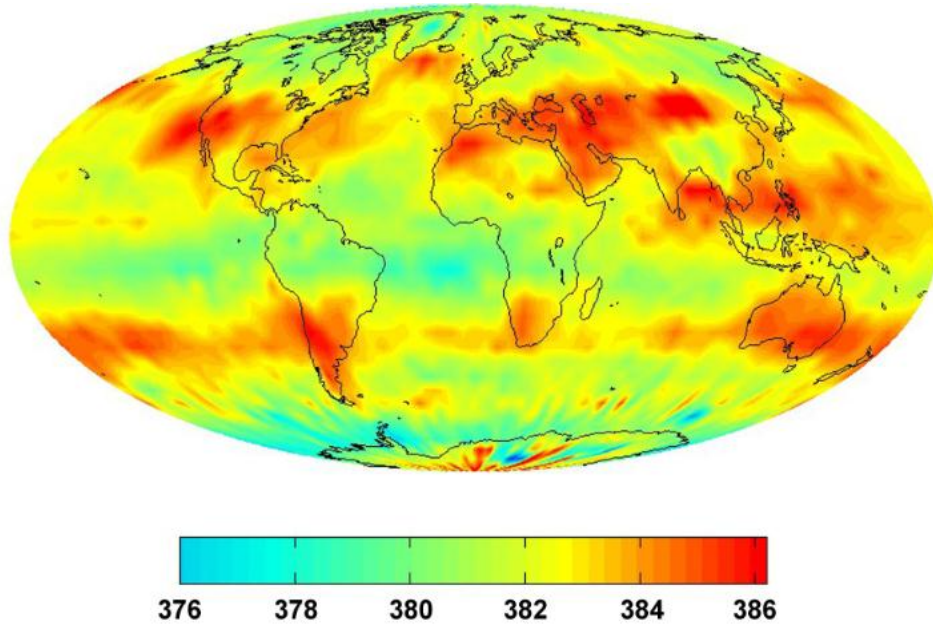


Abbildung 0.1: CO₂-Konzentration in ppmv (parts per million by volume) im Juli 2008. Karte ermittelt mit dem NASA Satelliten Aqua, siehe <http://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA11194>.

1. Zu Reduktion

1.1 Hintergrund

Für CO₂-Emissionen durch Gebäudebetrieb ist deren Energieverbrauch maßgeblich. Dabei wird gelegentlich mit dem Horizont des Energiebegriffs als auch mit dessen Quantifizierung unklar umgegangen. Bei Energiebedarf handelt es sich grundsätzlich um eine Berechnungsgröße, bei Energieverbrauch um eine Messgröße. Energie nach Horizonten

Nutzenergie: steht dem Verbraucher z. B. am Heizkörper zu Verfügung.

Endenergie: steht ab Eingang Gebäude zu Verfügung, dient der Sicherung der Nutzenergie inkl. Verluste und dient der Abrechnung.

Primärenergie: Energie zur Sicherung der Endenergie plus Aufwand nicht-erneuerbarer Energien entlang der Vorkette (Gewinnung, Transport, Umwandlung, Verteilung der Endenergie).

Zur Orientierung dient eine typische Mengenrelation entlang der Transport- bzw. Verbrauchskette

<i>Primärenergie</i>	→	<i>Endenergie</i>	→	<i>Nutzenergie</i>
100%		74%		67%

Horizonte sind je nach Zweck einer Energiebilanz oder –verbrauchsrechnung klar zu unterscheiden. Während im Sinne einer Gesamtanalyse die Primärenergie relevant ist, werden Emissionen häufig (z. B. bei GEMIS Daten) auf die Endenergie bezogen. Es ist insbesondere zu vermeiden, den Energieaufwand der Vorkette doppelt einzubeziehen; dies würde passieren, wenn Endenergiebezogene Emissionsfaktoren fälschlicherweise auf Primärenergie angewendet würden. Dann könnte eine Senkung der Primärenergie eine übergroße CO₂-Reduktion vortäuschen oder bei CO₂-Kompensation zu einem übergroßen Aufwand führen. Nichtsdestotrotz können Emissionskennzahlen an jeden Horizont der Energiekette gekoppelt werden.

Eine Übersicht über die Emissionen der Stromerzeugung nach Energieträgern bzw. Erzeugungsarten gibt Abbildung 1.1 aus [FrRaSch]. Dabei werden nicht nur Emissionen aus der reinen Erzeugung (Betrieb), sondern auch Emissionen aus vorgelagerten Prozessen und aus dem Stoffeinsatz zur Anlagenherstellung einbezogen.

Strom aus Kraft-Wärme-Kopplung ist demnach fast so günstig wie Strom aus regenerativen Energiequellen. Auch die Emissionen von Atomstrom, die nach Herkunftsland variieren, rangieren dabei etwa auf dem Emissionsniveau erneuerbarer Energien, wobei aber Emissionsaufwände der Brennstoffbeschaffung nicht berücksichtigt sind. Die Endlagerung ist nach Art und Dauer – möglicherweise über viele Generationen – offen, so dass über Art und Höhe evtl. damit verbundener Emissionen keine Aussage getroffen werden kann.

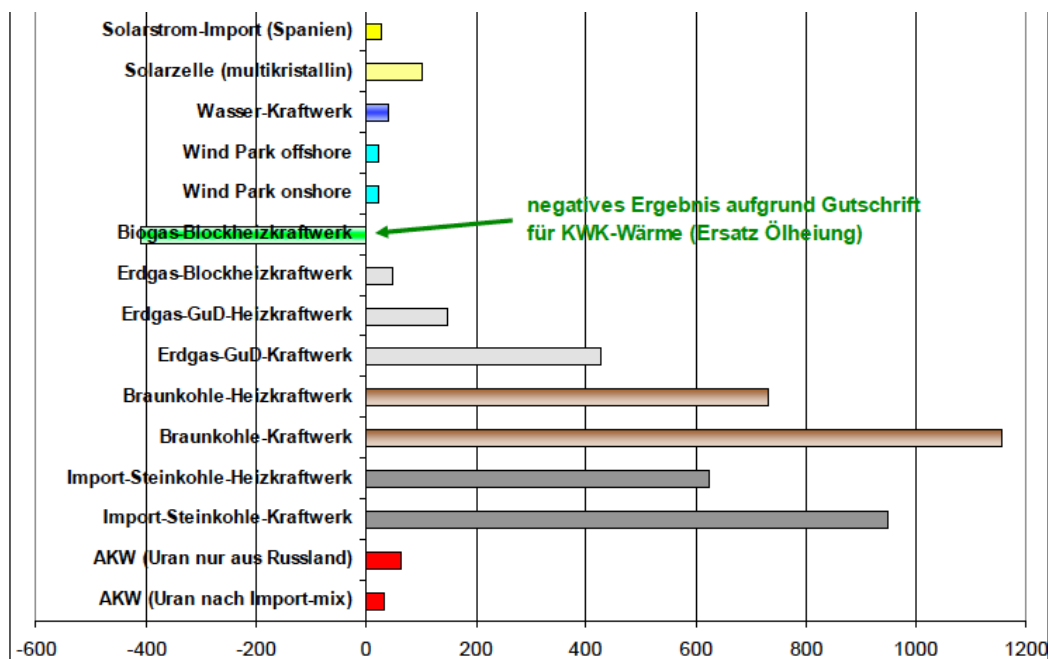


Abbildung 1.1: CO₂-Emissionen in g/kWh.

Für Gebäudeemissionen ist die Neufassung der EU-Gebäuderichtlinie (recast of the energy performance of buildings directive EPBD) von zentraler Bedeutung. Diese Richtlinie ist im Sommer 2010 in Kraft getreten. Die Richtlinie beinhaltet

noch Unklarheiten in wesentlichen Punkten, die individuellen Regelungen der EU-Staaten und sonstigen Klärungsprozessen überlassen werden.

Dies betrifft u. a. die Festlegung, dass Neubauten ab dem 1.1.2019 sog. Niedrigstenergiegebäude („high performance buildings“, in früheren Richtlinienentwürfen „Fastnullenergiegebäude“ genannt) sein müssen, sofern sie Eigentum von Behörden sind oder von ihnen genutzt werden. Für alle übrigen Neubauten gilt gleiches ab 1.1.2021. Für Bestandsbauten, die einer sog. großen Renovierung unterzogen werden, werden dieselben Standards und Termine angestrebt „... sofern dies technisch, funktionell und wirtschaftlich realisierbar ist“ (Artikel 7, EU-Gebäuderichtlinie).

Die genaue Spezifikation eines Niedrigstenergiegebäudes ist noch nicht erfolgt. Grundsätzlich sollen Mindestanforderungen an die Gesamtenergieeffizienz für Gebäude und Gebäudeteile gelten, um ein "kostenoptimales Niveau" zu erreichen. Dies ist das Energieeffizienzniveau, das die niedrigsten Kosten während der geschätzten wirtschaftlichen Lebensdauer verursacht. Der verbleibende Energieverbrauch soll aus regenerativen und möglichst ortsnahen Energiequellen gedeckt werden.

Es wird angestrebt, dass Niedrigstenergiegebäude im Betrieb energie günstiger sein werden als Passivgebäude. Die Mindestgröße von 1000 m² bei großen Renovierungen entfällt gegenüber der heutigen Gebäuderichtlinie. Danach gilt eine Renovierung als groß, wenn die Renovierungsarbeiten mehr als 25% des Gebäudewertes - ohne Grundstück – ausmachen oder wenn die Renovierungsarbeiten mehr als 25% der Gebäudehülle betreffen. Zwischen diesen beiden Optionen kann jedes Mitgliedsland der EU bei der Umsetzung in nationales Recht frei wählen.

Der Kabinettsbeschluss Hessen vom 17.5.2010 geht über die Anforderung der aktuellen Energieeinsparverordnung EnEV 2009 klar hinaus. So wird eine jährliche CO₂-Bilanz beginnend für 2008 („CO₂-Eröffnungsbilanz“) erstellt, die gebäude-, mobilitäts- und arbeitsmittel-bezogene Emissionen erfasst [FCC]. Bei

letzterem handelt es sich beispielsweise um Emissionen, die durch die IT Ausstattung verursacht werden.

Im wichtigen Gebäudebereich ist vorgesehen, dass bei Neubauten in Bezug auf ihre Gebäudehülle der Standard der EnEV 2009 um mind. 50% unterschritten wird. Beim Energieverbrauch für Büro- und Verwaltungsgebäude soll der Standard der EnEV 2009 ebenso um 50% unterschritten werden; sofern realisierbar und über den Lebenszyklus des Gebäudes nachweisbar wirtschaftlich, sogar um 70%. Für andere als Büro- und Verwaltungsgebäude ist eine Unterschreitung um 30% vorgesehen. Diese Regelungen bedeuten in Bezug auf Isolierung, dass für Neubauten praktisch der Passivhausstandard erreicht wird, s. u.

Bestandsbauten sollten nach einer energetischen Grundsanierung in Bezug auf ihren Energieverbrauch ebenso die EnEV 2009 Anforderungen für Neubauten voll erfüllen, und zwar ohne die danach mögliche 40% Überschreitung.

Erforderliche Restenergie soll aus regenerativen Quellen sowie z. B. aus Abwärme von Arbeitsgeräten gedeckt werden.

Im Rahmen der bereits vorliegenden, hessischen CO₂-Eröffnungsbilanz sind Daten über liegenschaftsbezogene Energieverbräuche und Ansätze zu Emissionsberechnungen, insbesondere die energieträgerabhängigen Emissionen pro kWh Endenergie, vorhanden. Diese werden auch den unten folgenden Abschätzungen und Szenarien zugrunde gelegt. D. h. diese Abschätzungen und Szenarien können gedanklich als mögliche(!) Fortschreibungen der Eröffnungsbilanz gesehen werden.

Grundsätzlich können Emissionen mit der CO₂-Senkenleistung von (staatlichem) hess. Forst bzw. Emissionsminderungen durch Aufforstungen in Hessen mit den Emissionen gemäß CO₂-Bilanz verrechnet werden. Hierzu wäre aber ein „fairer“ Anrechnungsschlüssel zu entwickeln.

Auch ist davon auszugehen, dass den Entwaldungen der letzten Jahre erst so junger Aufforstungsbestand gegenübersteht, dass derzeit kaum ein CO₂-Nettozusatzbindungseffekt vorliegt. Aufgrund des bereits hohen Waldbestandes in Hessen – neben Rheinland-Pfalz mit 42% Waldflächenanteil bundesweit am größten -- und anderer sich abzeichnender Belange ist auch zukünftig von einem eher geringen, zusätzlichen Kompensationspotential durch örtliche Aufforstung auszugehen (Quelle: Hessen Forst).

Das „Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung“ der Bundesregierung vom 28.10.2010 umfasst u. a. den top-level Aspekt „Energetische Gebäudesanierung und energieeffizientes Bauen“, siehe www.bundesregierung.de/Webs/Breg/DE/Energiekonzept/energiekonzept.html. Hier werden für Neu- und Bestandsbauten signifikante Energieverbrauchsreduktionen angestrebt. Verbleibender Energieverbrauch soll aus regenerativen Quellen gedeckt werden.

Auszug aus dem Energiekonzept: „Die Bundesregierung wird für ihre künftigen Neubauten und bei bestehenden Liegenschaften eine Vorbildfunktion bei der Reduzierung des Energieverbrauchs einnehmen.“ Die hessischen Maßnahmen streben dies schon heute konkret an.

Sofern ein Niedrigstenergiegebäude sich am heutigen Standard von Passivhäusern orientiert, gelten folgende Anforderungs- oder Richtwerte (www.passiv.de)

- Heizwärmebedarf (als Endenergie!) $\leq 15 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ und
- Primärenergiebedarf(!) inkl. sog. Haushaltsstrom $\leq 120 \text{ kWh/m}^2\text{a}$

Anders als bei der Energieeinsparverordnung EnEV hängen die Anforderungswerte nicht von der Gebäudeform ab und es entfällt auch die Unterscheidung zwischen Wohngebäuden und Nichtwohngebäuden.

Die Baukosten pro m² eines Einfamilienpassivhauses liegen „maximal“ 10%-15% oberhalb des heutigen EnEV Standards. Bei größeren Gebäuden wie Verwaltungsgebäuden werden 5%-8% angegeben. (Quelle: Interview mit Passivhausinstitut).

Sofern ein Niedrigstenergiegebäude sich am heutigen Standard von Niedrigenergiehäusern orientiert, gilt die Anforderung

- Heizwärmebedarf (nun als Primärenergie!) < 50-80 kWh/m²a.

Es ist zu beachten, dass der EnEV 2009 Standard keine fixen Grenzwerte verwendet, sondern fallweise vorgeht. Mittels eines Vergleichsgebäudes, bei dem u. a. Lage eingeht, wird fallweise die Grenzwertberechnung vorgenommen. Die EnEV 2009 orientiert sich stark am Standard für Niedrigenergiehäuser.

Zusammenfassung der wesentlichen offenen Punkte der Gebäuderichtlinie:

1. Was ist ein Niedrigstenergiegebäude? (gemäß Anhang I der Gebäuderichtlinie zu regeln)
2. Wie berechnet sich das kostenoptimale Niveau über den Lebenszyklus eines Gebäudes? (gemäß Anhang IIIa der Gebäuderichtlinie zu regeln).

Es erscheint kaum möglich, zu 2. aktuell zu einer Einschätzung zu gelangen. Zu 1. wurden einige „Expertenansichten“ eingeholt. Der Hauptverband der Deutschen Bauindustrie, Berlin, vertritt die Einschätzung, dass Niedrigstenergiegebäude bei Neubauten klar den heutigen oder einen leicht modifizierten Passivhausstandard erfüllen werden. Dabei wird die Gebäudehülle gegenüber dem heutigen Stand eher noch besser isolierend sein. Bei Sanierungen wird es nicht als wirtschaftlich vertretbar angesehen, Passivhausstandard anzustreben. Hier wird für Bürogebäude ein wirtschaftlich erreichbarer Heizwärmebedarf (als Endenergie) im Bereich 50-70 kWh/m²a gesehen.

Das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Berlin bzw. Bonn, vertritt eine ähnliche Sicht, formuliert diese aber viel vorsichtiger, da nicht alle Richtwerte des Passivhausstandards als gesetzlich belastbar angesehen werden. Über die Novellen zur Energieeinsparverordnung 2012 und 2015/16 will man sich an die Spezifikation eines Niedrigstenergiegebäudes herantasten. Ebenso sei offen, ob es bei der Bezeichnung Niedrigstenergiegebäude bleiben wird. Im folgenden wird daher gelegentlich die Formulierung „Passivhausstandard o. ä.“ verwendet.

Je nach dem verwendeten Mix der Energieträger kann der errechnete Primärenergiebedarf größer oder kleiner sein als die Endenergie! Je mehr regenerative und lokale Energieträger eingesetzt werden, desto eher ist die rechnerische Primärenergie kleiner als die Endenergie. Die Sicht der EU-Gebäuderichtlinie und der EnEV sind deckungsgleich.

Zur Ermittlung der Primärenergie (im Sinne der EnEV!) wird der Endenergiebedarf für den entsprechenden Energieträger mit einem Primärenergiefaktor (PEF) multipliziert. Diese Faktoren sind u. U. national oder regional unterschiedlich. Primärenergiefaktoren, wie in der Energieeinsparverordnung EnEV, Anlage 2 zu §§4 und 9, geregelt gemäß DIN V 18599 sind in der folgenden Tabelle in Abb. 1.2 angegeben.

Heizöl, Erdgas, Flüssiggas	1,1
Steinkohle, Braunkohle	1,1 bzw. 1,2
Holz	0,2
Nah- und Fernwärme aus Kraft-Wärme-Kopplung	0,0 bzw. 0,7 (nicht-erneuerbar)
Nah- und Fernwärme aus Heizwerken	0,1 bzw. 1,3 (nicht-erneuerbar)
Strom	0,0 bzw. 2,6 (nicht erneuerbar)
Biomasse	0,5 (unmittelb. räuml. Zushg.) bzw. 1,1
Umweltenergie (Solarenergie, Umgebungswärme, u.ä.)	0,0

Abbildung 1.2: Ausgewählte Primärenergiefaktoren.

Da sich Neubauten auf eine Sicht von 10 Jahren am heutigen Passivhausstandard orientieren werden und da Hessen dies für Landesbauten schon für einen viel früheren Zeitpunkt plant s. o., sollen die CO₂-Emissionen aus dem Betrieb eines solchen Gebäudes abgeschätzt werden. Aufgrund zahlreicher Unsicherheitsfaktoren einer solchen Berechnung, insbes. durch die Gebäudenutzung, kann der sog. Haushaltsstrom (Verbraucherstrom, der nicht dem Gebäude zugeordnet werden kann) nur mit Schwierigkeiten und verbleibender Unsicherheit geschätzt werden.

In Anlehnung an die Passivhausrichtwerte wird zu Zwecken von Näherungsrechnungen folgender Endenergiebedarf für den reinen Gebäudebetrieb angenommen:

- Heizwärmebedarf $\leq 15 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ und
- Strombedarf $\leq 15 \text{ kWh/m}^2\text{a}$.

Es wird weiterhin angenommen, dass der Strombedarf zu 50% aus gebäudenahen, regenerativen Quellen erzeugt wird, z. B. durch eine Photovoltaikanlage und zu 50% aus dem Stromnetz bezogen wird. Dabei werden zunächst die folgenden, heute typischen Emissionskennwerte unterstellt

1kWh Wärme aus Gas	→ 202 g CO ₂
1kWh Strom aus generellem Mix	→ 572 g CO ₂ .

In Anlehnung an die CO₂-Eröffnungsbilanz werden Werte ohne Berücksichtigung der Vorkette angesetzt. Wertangaben schwanken leicht, was sich auf unterschiedliche Quellen, geografische Verbrauchsregionen und Jahre bezieht.

1.2 Situation Hessische Landesverwaltung

Zur Analyse der derzeitigen Situation und als Berechnungshilfe für Szenarien werden Emissionen auf Gebäudeflächen bezogen. Dies ist vor allem bzgl. der

Szenarien unumgänglich, da sich die gebäudebezogene Reduktionskomponente der CO₂-Strategie stark an Neubau und Sanierungen orientiert. Diese wiederum sind flächenbezogen.

Aufgrund der Zusammenführung von mehreren Datenquellen, vor allem [HBM], und aufgrund von Abstimmungsergebnissen wird von folgenden **Näherungswerten** für Flächendaten ausgegangen

Direkte Landesliegenschaften	3,8 Mio m ² BGF
Hochschulen und Universitäten	3,4 Mio m ² BGF
angemietete Liegenschaften	0,3 Mio m ² BGF
Summe	7,5 Mio m ² BGF

BGF bezeichnet Bruttogeschossfläche. Die Emissionen der angemieteten Liegenschaften sind in der CO₂-Eröffnungsbilanz berücksichtigt und machen ca. 3,5% der gesamten gebäudebezogenen Emissionen aus. Hier werden diese aber gelegentlich nicht in die Überlegungen einbezogen, da der Gestaltungsspielraum sich vor allem auf landeseigene Gebäude bezieht.

Gebäude	Emissionen aus Wärme + Kälte etc.	Stromemissionen	Summe
Landeseigene	68 113 + 1 524	76 570	146 204
Hochschulen und Univ.	105 698	129 418	235 116
Angemietet	7 013	6 798	13 811
Summe	182 345	212 786	395 131

Abbildung 1.3: Matrix der Jahresgebäudeemissionen in t gemäß CO₂-Eröffnungsbilanz [FCC].

Die Emissionswerte in Anlehnung an den Passivhausstandard führen unter den gemachten Annahmen auf CO₂-Emissionen von $15 * 202 \text{ g} + 7,5 * 572 \text{ g} =$

7,32 kg pro Jahr und m². Bei 7,2 Mio. m² führt dies auf jährliche CO₂-Emissionen von immerhin noch 52 704 t. Sofern angemietete Liegenschaften einbezogen werden, ergeben sich 7,5 Mio. m² * 7,32 kg/m² = 54 900 t an jährlichen Emissionen.

In [Pl, S.161] wird für ein Nichtwohngebäude nach Sanierung auf Passivhausstandard eine CO₂-Belastung von 10,3 kg pro Jahr und m² angegeben, allerdings ohne offengelegte Kalkulationsgrundlage. Für 7,2 Mio. m² führt dies auf jährliche CO₂-Emissionen von 74 160 t und für 7,5 Mio. m², also bei Einbeziehung der angemieteten Liegenschaften auf 77 250 t.

Geht man von den derzeitigen gesamten, den direkten Liegenschaften der Hess. Landesverwaltung sowie den Hochschulen und Universitäten zurechenbaren CO₂-Emissionen von 381 320 t pro Jahr aus, so ergeben sich spezifische Emissionen von 381 320 t/7,2 Mio. m² = 52,96 kg pro Jahr und m². Für die direkten Landesliegenschaften sind dies 146 204 t/3,8 Mio. m² = 38,47 kg pro Jahr, für die Hochschulen und Universitäten sind dies 235 116 t/3,4 Mio. m² = 69,15 kg pro Jahr und für die angemieteten Liegenschaften ergeben sich lediglich 13 811 t / 0,3 Mio. m² = 46,03 kg pro Jahr. In diesen Angaben ist der gesamte Strom- und Wärmebedarf enthalten, nicht nur der dem reinen Gebäudetrieb zurechenbare. Nach Rücksprache mit dem Hessischen Baumanagement liegen Daten für eine feinere Aufschlüsselung derzeit nicht vor.

In öffentlichen Gebäuden wie Bürogebäuden, Schulen etc. entfällt laut Einschätzung eines einschlägig tätigen Ingenieurbüros in Berlin, www.iaf-ingenieure.de ca. 70%-75% des Stromverbrauchs auf die Nutzung (Arbeitsplatzbeleuchtung, PCs, Sonderausstattung wie z. B. Küchen, Studiobeleuchtung, Werkstätten) und die restlichen ca. 25%-30% auf die Gebäudetechnik. Diese Aussage basiert auf Begehungen und Analysen von Nichtwohngebäuden wie z. B. Schulen durch iaf (Quelle: Interview). Ein weitgehend ähnlicher Befund wurde in einem Vorhaben des BMWi-Programms „Energieoptimiertes Bauen“ [EnOB] erzielt. Die Aufteilungen unterliegen natürlich gebäudeabhängigen Schwankungen, was auch in [We] festgestellt wurde. Ähnliche Zahlen-

werte, allerdings für das Verhältnis von Wärme- vs. Gebäudestrombedarf (d. h. nicht Wärme- vs. gebäudebedingter Gesamtstromverbrauch) für Verwaltungsgebäude gemäß ENEC 2009 sind als Faustformel in [HRT] genannt.

Ausgehend von einem gebäudeseitigen Stromanteil von 25% belaufen sich die derzeitigen, den Gebäuden zurechenbaren CO₂-Emissionen auf 235 542 t (= 182 345 t für Wärme plus 0,25 * 212 786 t für Strom) pro Jahr. Dies ergibt derzeitige gebäudebezogene, spezifische Jahresemissionen im Durchschnitt von $235\,542\text{ t} / 7,5\text{ Mio. m}^2 = 31,41\text{ kg/m}^2$.

Von diesem Durchschnittswert kann es erhebliche Abweichungen geben. Ein Gebäude mit stark überdurchschnittlichem Wärmeverbrauch von z. B. 300 kWh/m²a und einem Stromverbrauch von z. B. 42 kWh/m²a führt auf spezifische Jahresemissionen von etwa $300 * 0,202\text{ kg/m}^2 + 0,25 * 42 * 0,572\text{ kg/m}^2 = 66,61\text{ kg/m}^2$.

Zur Gewinnung von Orientierungswerten werden im folgenden Reduktionsabschätzungen bei Gebäudemassnahmen unter verschiedenen Annahmen vorgenommen. Ausgangsbasis ist jeweils die gerundete Jahresemission von **235 500 t**.

1.2.1 Reduktionsabschätzungen auf Basis von Durchschnittsverbräuchen und gleich bleibendem Strommix

Geht man weiterhin davon aus, dass sich derzeit (fast) keine Passivhäuser im Bestand befinden, so würde eine Komplettumstellung auf den Passivhausstandard o. ä. demnach eine absolute jährliche Emissionsreduktion von 31,41 kg/m² auf 7,32 kg/m² bewirken, also eine Reduktion um ca. 77%.

Es ist allerdings davon auszugehen, dass eine komplette Umstellung auf den Passivhausstandard o. ä. innerhalb der nächsten 20 Jahre unmöglich ist. Werden z. B. nur 10% der Gebäudefläche auf diesen Standard gesenkt und bleibt der übrige Bestand auf dem aktuellen Emissionsniveau, so verbleiben von den jährlichen gebäudebezogene CO₂-Emissionen von 235 500 t immerhin noch

$7,5 \text{ Mio.} * (0,9 * 31,41 + 0,1 * 7,32) \text{ kg} = 217 508 \text{ t}$. Dies stellt eine Reduktion von nur 7,6% dar.

Werden über 10 Jahre hinweg pro Jahr 40 000 m² Neubau als Ersatz erstellt, d. h. alt durch neu ersetzt, so liegt nach 10 Jahren lediglich eine Quote von 5,33% im Passivhausstandard o. ä. vor. Dies bedeutet nach den vorangegangenen Annahmen, dass jährliche gebäudebezogene CO₂-Emissionen von immerhin noch $7,5 \text{ Mio.} * (0,9467 * 31,41 + 0,0533 * 7,32) \text{ kg} = 225 945 \text{ t}$ verbleiben. Es ergibt sich dann eine Emissionsreduktion von nur 4%.

In einer günstigen Betrachtung werden 10% der Gebäudefläche durch Neubau auf den Passivhausstandard o. ä. gesenkt und weitere 20% energetisch zu Passivhausstandard o. ä. saniert. Dann verbleiben jährliche gebäudebezogene CO₂-Emissionen von $7,5 \text{ Mio.} * (0,7 * 31,41 + 0,3 * 7,32) \text{ kg} = 181 373 \text{ t}$, es ergibt sich also eine Reduktion um 23%.

Werden 10% der Gebäudefläche durch Neubau auf den Passivhausstandard o. ä. gesenkt und weitere 20% energetisch zu einem um 100% bzw. 150% schlechteren Standard (etwa Niedrigenergiehausstandard) saniert, so verbleiben jährliche gebäudebezogene CO₂-Emissionen von $7,5 \text{ Mio.} * (0,7 * 31,41 + 0,1 * 7,32 + 0,2 * 2 * 7,32) \text{ kg} = 192 353 \text{ t}$ bzw. $7,5 \text{ Mio.} * (0,7 * 31,41 + 0,1 * 7,32 + 0,2 * 2,5 * 7,32) \text{ kg} = 197 843 \text{ t}$. Es ergeben sich Reduktionen um 18,3% bzw. 16%.

Gerade bei niedrigen Ersatzraten werden die gebäudebezogenen Emissionen nicht wesentlich geringer, auch wenn der Strommix in den nächsten zehn und mehr Jahren zu günstigeren Emissionen führt.

1.2.2 Reduktionsabschätzungen auf Basis von gebäudeabhängigen Verbräuchen und gleich bleibendem Strommix

Zur Verfeinerung der Reduktionsabschätzungen durch Neubau und energetische Sanierung werden nun Maßnahmen auf einzelne Gebäude bzw. Liegenschaften mit den höchsten Verbräuchen gemäß der Daten [HBM] bezogen.

In einer weiteren Abschätzung der möglichen Emissionsreduktionen werden zwei Phasen von je z. B. 10 Jahren angenommen. In beiden Phasen werden je ca. 400 000 m² neu gebaut im Passivhausstandard o. ä. und zusätzlich werden je 400 000 m² zu einem 100% höheren Standard saniert. Dazu wird gemäß der vorliegenden Verbrauchsdaten eine Einteilung gemäß Emissionen vorgenommen in vier Gruppen zu je ca. 400 000 m²: Gruppe 1 (höchste Emissionen pro Fläche), Gruppe 2 (zweithöchste Emissionen pro Fläche) etc.

Gruppenzuordnung:

<i>Phase 1</i>	Neubau	1. Gruppe
	Sanierung	3. Gruppe
<i>Phase 2</i>	Neubau	2. Gruppe
	Sanierung	4. Gruppe

Zur Ermittlung der Gruppen wurden alle Liegenschaften gemäß EMIS verfügbarer Verbrauchswerte [HBM] absteigend sortiert nach dem Kennwert

$$\text{Wärmeverbrauch pro m}^2 + 0,25 * \text{Stromverbrauch pro m}^2.$$

Die diesem Kennwert nach höchste Liegenschaft, die zweithöchste etc. wurden der Gruppe 1 zugeordnet, bis die Gesamtgröße dieser Liegenschaften 400 000 m² erreicht hatte. Von den verbliebenen Liegenschaften wurde die mit dem dann höchsten Kennwert, dem dann zweithöchsten Kennwert etc. der Gruppe 2 zugeordnet, bis wiederum 400 000 m² erreicht wurden. Analog wurde danach die Gruppe 3 und zuletzt die Gruppe 4 bestimmt.

Der Grund für diese Verschachtelung der Gruppen ist, dass die Gebäude mit höchsten Energieverbräuchen bzw. Emissionen durch Neubauten ersetzt werden sollten und die mit sich in der Höhe anschließenden Energieverbräuchen bzw. Emissionen saniert werden sollten. Bei der Zuordnung von Energieverbräuchen bzw. Emissionen zu Flächen stellten sich einige hartnäckige Datenin-

konsistenzen heraus. Diesen wurde ebenso hartnäckig mit Glättungen und Skalierungen begegnet.

Aufgrund aller bisherigen Annahmen lässt sich grob abschätzen, dass die gesamten gebäudebedingten Emissionen in der ersten Phase von 235 500 t auf 195 653 t gesenkt werden können. In der zweiten Phase ergibt sich eine weitere Senkung auf 158 179 t. Bezogen jeweils auf das Ausgangsniveau mit Referenzjahr 2008 sind dies Senkungen um 16,9% bis zum Ende der ersten Phase und weitere 15,9% bis zum Ende der zweiten Phase. Insgesamt lässt sich hieraus die näherungsweise Emissionskurve in Abb. 1.4 ableiten.

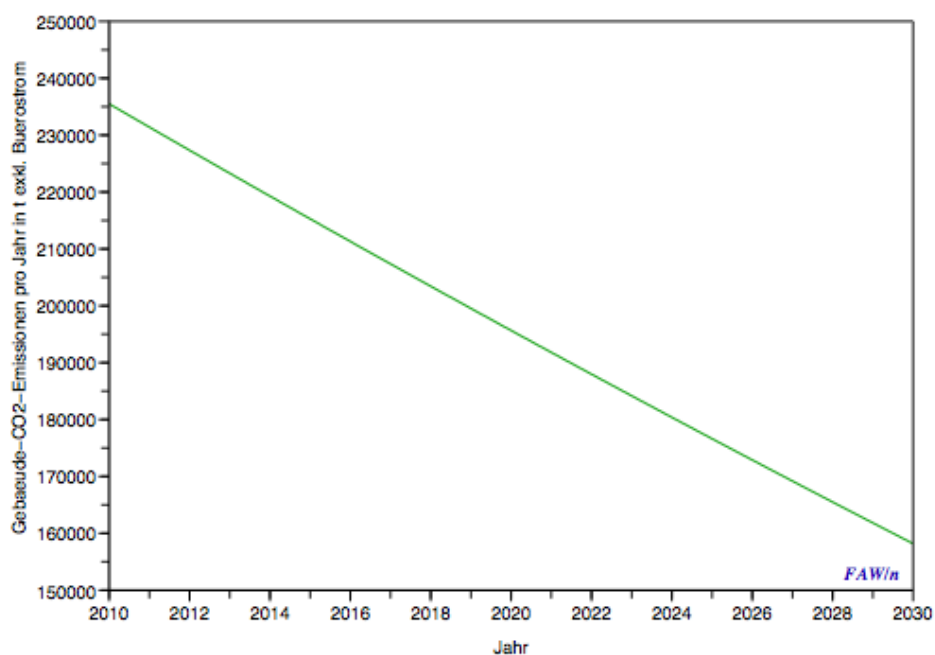


Abbildung 1.4: Annähernd linearer, möglicher Reduktionspfad der jährlichen, gebäudebedingten CO₂-Emissionen in t ohne Nutzstrom sowie ohne Änderung des Strommixes.

1.3 Aktuelle Detailanalyse von Emissionsdaten

Aktuell steigt der Stromverbrauch pro Fläche mit der Liegenschafts-/Gebäudegröße. Dies ist zu erwarten, da mit der Gebäudegröße generell auch die Haus-

technik aufwendiger wird. Auch der Wärmeverbrauch pro Fläche steigt mit der Liegenschafts-/Gebäudegröße. Dies ist nicht unbedingt zu erwarten, denn, zumindest bei günstigen Verhältnissen von Gebäudefläche zu -volumen („A/V-Verhältnis“) könnte eine Abnahme vermutet werden. Sowohl beim Strom- als auch beim Wärmeverbrauch kann der Eindruck entstehen, dass die wenigen großen Liegenschaften einen dominanten Einfluss auf die Zu- bzw. Abnahme ausüben. Der Befund sieht dann auch etwas anders aus bei Beschränkung auf Liegenschaften unter 100 000 m². Der Stromverbrauch pro Fläche bleibt steigend, während der Wärmeverbrauch pro Fläche mit zunehmender Liegenschafts-/Gebäudegröße fällt.

Es sollte auf Einzelfallbasis geprüft werden, ob hier ein Artefakt der Verbrauchsdaten vorliegt, da die Daten der großen Liegenschaften nicht gebäudeweit aufgelöst sind, oder ob es sich um einen substantziellen Effekt handelt. Im ersten Fall sollte die Datenerhebung im Interesse von CO₂-Bilanzierungen möglichst feiner aufgelöst werden. Im zweiten Fall liegt es sehr nahe, dass energetische Sanierung oder energiegünstiger Neubau bei den großen Liegenschaften pro Fläche zu übergroßen Energie- und Emissionsreduktionen führen.

Näheres in Anhang A.

1.4 Optimierungsansätze zur Prioritätensetzung für CO₂ Reduktion bei Bauten; Emissionsminimierung bei vorgegebenen Maximalkosten

Sofern über Neubau und Sanierung einer großen Anzahl von Gebäuden bzw. Liegenschaften simultan entschieden werden soll, liegt ein Problem der Portfoliooptimierung vor. Zur Generierung einer Vorschlagsliste über Neubau, Sanierung und unveränderte Beibehaltung von Gebäuden kann eine Optimierungsrechnung vorgenommen werden. Diese verfolgt das Ziel, Neubau- und Sanierungsbudgets so einzusetzen, dass die größtmögliche Emissionsreduktion erreicht wird. Das Verfahren ist in Anhang B skizziert.

In diesem Verfahren spielen einerseits Neubau- und Sanierungskosten pro Fläche und andererseits die durch Neubau bzw. Sanierung erzielbaren Emissionsreduktionen pro Fläche eine zentrale Rolle. Dies zielt auf Minimierung von CO₂-Vermeidungskosten. CO₂-Vermeidungskosten sind ein wesentlicher Indikator.

Allerdings ist dieser Indikator im Zusammenhang mit Neubau- und Sanierungsentscheidungen eher relativ zu verwenden („welche Neubau- oder Sanierungsmaßnahme ist besser als welche andere?“) als absolut („soll Neubau oder Sanierung überhaupt vorgenommen werden?“). Dies liegt daran, dass energetische Sanierungsmaßnahmen leicht € 200/m² übersteigen können [SD] und CO₂-Emissionen derzeit nicht „kostenpflichtig“ sind. Erst wenn die erzielbaren Energieeinsparungen berücksichtigt werden, kann kostenmäßige Amortisation über die Restlebensdauer eines Gebäudes möglich werden. Letzteres hängt von Gebäudespezifika und von Annahmen über die Energiepreisentwicklung ab.

2. Zu Substitution

2.1 Hintergrund

Von der Internationalen Energie Agentur wird in ihrer Studie „Gadgets and Gigawatts“ [IEA] geschätzt, dass sich der globale Stromverbrauch durch den weiteren Vormarsch von Informationstechnik von 2009 bis 2020 verdoppelt und bis 2030 verdreifacht. Dieser Mehrverbrauch wird auch bei gesteigerter Energieeffizienz prognostiziert. Hier tritt der Bumerangeffekt oder negative Skaleneffekt ein: die zunehmende Vielfalt und Verbreitung elektronischer Geräte verzehrt den Minderverbrauch pro Gerät. Nichtsdestotrotz ist der Einsatz stromsparender Geräte und stromsparender Umgang mit diesen geboten. Für den Stromverbrauch insgesamt, also nicht nur für den IT Bereich, wird in [VDMA] ein wesentlich geringeres Wachstum geschätzt: +13% von 2007 bis 2030.

Auf der Erzeugungsseite wird von der Energy Watch Group, die durch die Ludwig-Bölkow-Stiftung unterstützt wird, in einer Studie von 2008 [PeLe] geschätzt, dass sich bis 2030 33% des Stroms und 8% der Wärme bis hin zu 54% des Stroms und 13% der Wärme in den OECD Ländern durch erneuerbare Energien decken lassen können. Die großen Schwankungen erklären sich dadurch, dass es sich nicht um Prognosen, sondern um Szenarien mit sehr verschiedenen Investitionsannahmen handelt. Abbildungen 2.1 und 2.2 zeigen geringe bzw. hohe Kapazitätsentwicklungen (für Leistung) erneuerbarer Energien zur weltweiten Stromproduktion.

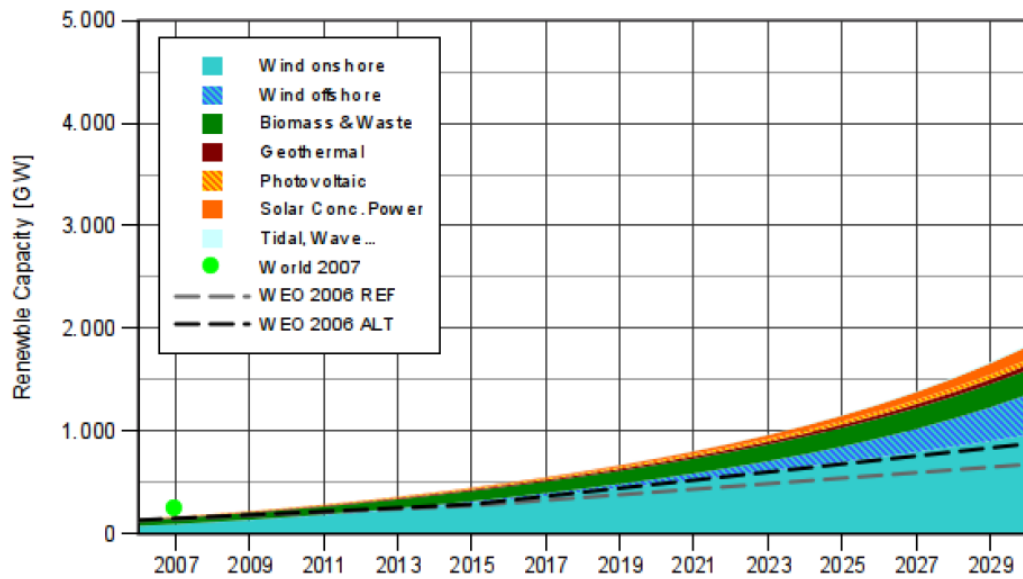


Abbildung 2.1: Szenario mit niedriger Kapazitätsentwicklung [PeLe].

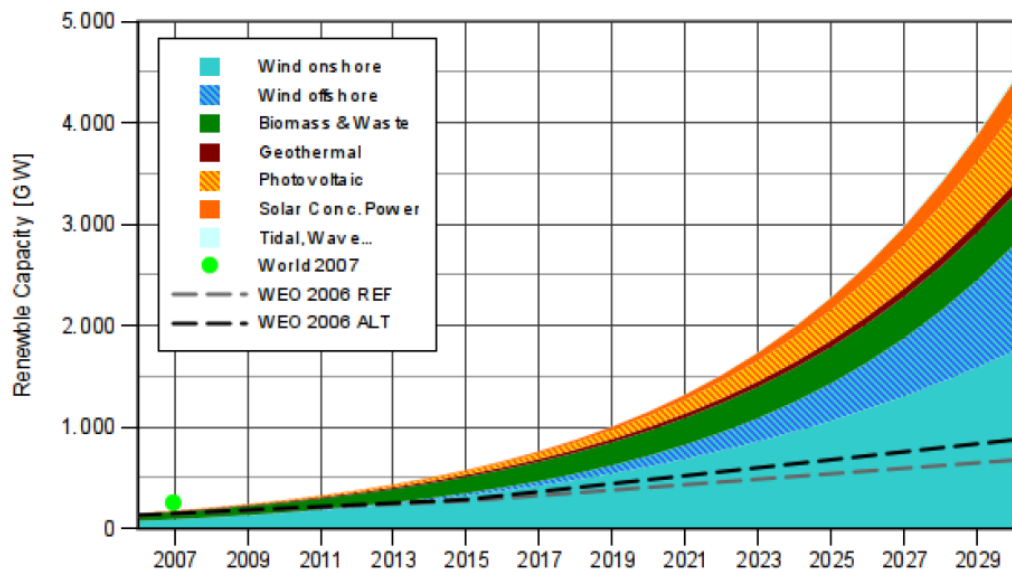


Abbildung 2.2: Szenario mit hoher Kapazitätsentwicklung [PeLe].

Die Agentur für Erneuerbare Energien, Berlin, schätzt, dass im Jahr 2020 47% der Stromproduktion aus erneuerbaren Energien stammt, siehe www.unendlich-viel-energie.de. Der Verband deutscher Maschinen- und Anlagenbau schätzt in einem kürzlich aktualisierten Ausblick etwas vorsichtiger für

den Strommix der EU bis 2020 einen Anteil von 30% erneuerbare Energien und bis 2030 einen Anteil von 48% [VDMA], siehe Abbildung 2.3.

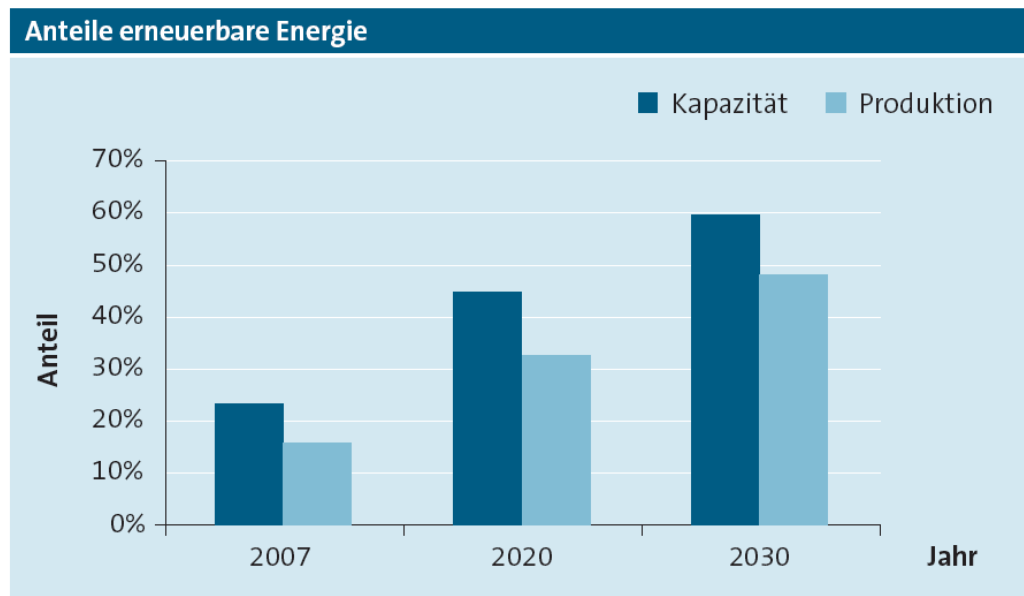


Abbildung 2.3: VDMA Ausblick.

Der EU Strommix für 2030 wird vom VDMA plakativ als 50/30/20-Regel formuliert:

50% des Stroms stammen aus erneuerbaren Energien, 30% aus fossilen Energieträgern und 20% aus Kernenergie. Mit der Verschiebung der Stromerzeugung zu erneuerbaren Energien werden Reduktionen der CO₂-Emissionen verbunden sein, und zwar bis 2020 um -15% und bis 2030 um -45%.

Prognosen für die zukünftigen Emissionen durch Strom variieren stark und reichen hinunter bis 160 g/kWh. Geht man für 2030 von CO₂-Emissionen durch Strom aus erneuerbaren Energien von 40 g/kWh aus und behält für die verbleibenden 52% Strom den Wert von 572 g/kWh bei bzw. geht man von 500 g/kWh aus, so ergeben sich für den zukünftigen Mix Emissionen von 354 g/kWh bzw. 284 g/kWh. Nach VDMA Schätzung und Anlehnungen daran liegen die Werte für 2020 bei 538 g/kWh und bei durchaus schon optimistischen 348 g/kWh für 2030. Alle derartigen Werte müssen als Näherungen aufgefasst werden! Einer der Gründe besteht darin, dass schon der heutige Strommix erneuerbare Energien beinhaltet und somit Fortschreibungen auf unterschiedli-

chen „Ausgangsdaten“ basieren. Ausserdem besteht eine gewisse Unklarheit über den Einfluss bzw. das Weglassen der Vorkette.

2.2 Situation Hessische Landesverwaltung

Die durch „Nutzstrom“ oder „Bürostrom“ in den Gebäuden der Hess. Landesverwaltung erzeugten Emissionen werden auf Basis der CO₂-Eröffnungsbilanz mit $395\,131\text{ t} - 235\,500\text{ t} = 159\,631\text{ t}$ angesetzt. Selbst wenn sich der gesamte nutzungsbezogene Stromverbrauch bis 2020 verdoppeln sollte – wie von der IEA nur für IT angenommen –, steigen die Emissionen aufgrund des sich erhöhenden Anteils an erneuerbaren Energien bei der Stromerzeugung nicht im selben Masse („windfall profit“).

Für ein Szenario, das auch die Substitutionskomponente der CO₂-Neutralisierungsstrategie berücksichtigt, wird nun angenommen, dass die Emissionen für 1 kWh Strom in 2020 bei 412 g und in 2030 bei 316 g liegen. Um die Gesamtemission für die nächsten 20 Jahre zu schätzen, werden nun weitere Annahmen getroffen bzw. zusammengefasst.

1. Bei den rein gebäudespezifischen Emissionen geht man von den Verbrauchsschätzungen der zwei Phasen aus Abschnitt 1.2.2 aus.
2. Der darüber hinausgehende Stromverbrauch kann über zehn Jahre hinweg um durchschnittlich 2% p. a. gesenkt werden durch stromsparende Geräte, stromsparende Arbeitsplatzbeleuchtung, Nutzerverhalten etc. In den dann folgenden zehn Jahren kann der Stromverbrauch nochmals um durchschnittlich 1% p. a. gesenkt werden.

Vorbehaltlich dieser Annahmen resultiert die in Abbildung 2.4 gezeigte Kurve der gesamten, durch und in den Gebäuden der Hess. Landesverwaltung verursachten Emissionen mit Verminderung von 395 131 t auf ca. **223 300 t**. Alle Berechnungen und eigene Grafiken erfolgten in Scilab [Sci].

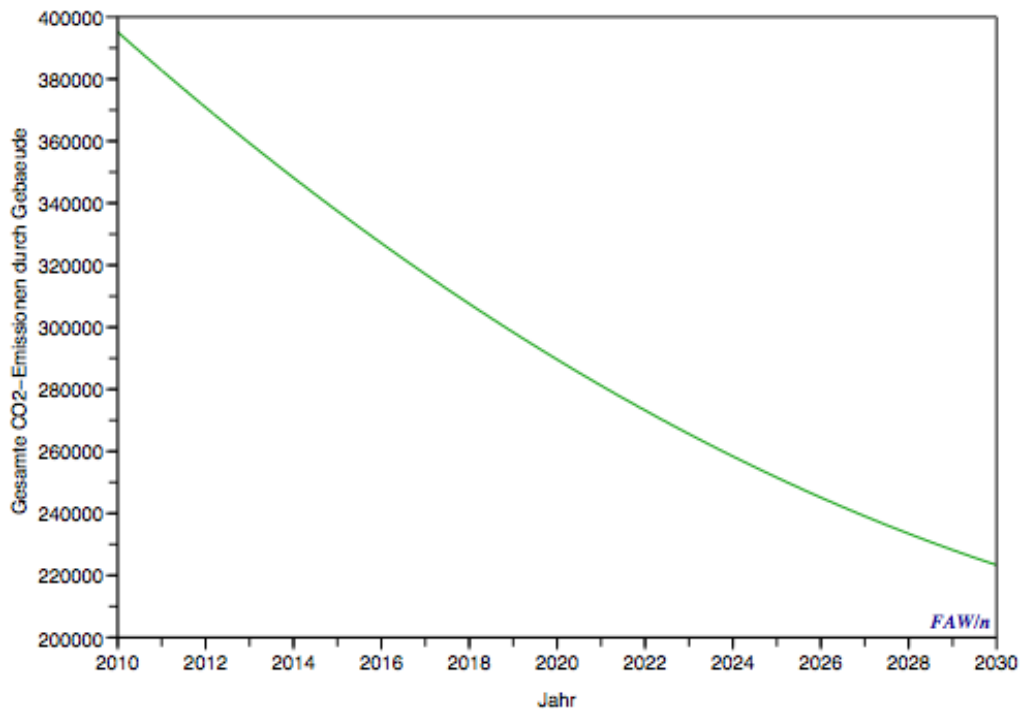


Abbildung 2.4: Möglicher Reduktionspfad der jährlichen, gebäudebedingten CO₂-Emissionen in t inkl. Nutzstrom und Berücksichtigung von Substitutionseffekten, d. h. bei sinkenden Emissionen pro verbrauchter Energie.

Der konvexe („nach unten durchgebogene“) Kurvenverlauf erklärt sich dadurch, dass Reduktionseffekte zu Beginn eine stärkere Auswirkung haben als gegen Ende des Betrachtungszeitraums. Dies entspricht dem Prinzip des abnehmenden Grenznutzens.

Es zeichnen sich für eine mögliche Entwicklung bis zum Jahr 2030 die folgenden Verhältnisse ab:

31	:	69
Substitution	:	Reduktion
56	:	44
Kompensation	:	Reduktion und Substitution

Insbesondere ist der zu erwartende Kompensationsbedarf zur Erzielung von CO₂-Neutralität größer als das Vermeidungspotenzial. Hieran dürften Änderungen der Strategie und Abweichungen von den Parameterannahmen grundsätzlich kaum etwas ändern.

Allerdings zeigen Variationen der obigen Annahmen, dass der konvexe Kurvenverlauf in einen konkaven („nach oben durchgebogenen“) Kurvenverlauf übergehen kann. Dies geschieht, wenn die durch Sanierung und Neubau erzielten Emissionsreduktionen durch übergroßen Verbrauchsanstieg bei „Bürostrom“ teilweise aufgezehrt werden. Ebenso kann es zu einem konkaven Kurvenverlauf kommen, wenn sich der Verbrauch von „Bürostrom“ kaum ändert, aber die Emissionen nur aufgrund von Strommixänderungen in den Jahren 2020-2030 wesentlich stärker sinken als 2010-2020.

Insgesamt ist vor diesem Hintergrund ist das Ziel der Hess. Landesverwaltung sinnvoll, in Bezug auf „Substitution“

- den Mix des abgenommenen(!) Stroms so weit wie möglich in Richtung erneuerbare Energien zu verschieben,
- die Energieeffizienz, vor allem die Stromeffizienz zu erhöhen
- und sogar die Verschiebung der Stromerzeugung in Richtung erneuerbare Energien gemäß vorhandener Investitionsmittel zu fördern. Letzteres ggf. in private public partnerships.

In Bezug auf Strom aus erneuerbaren Energiequellen sollte Wert gelegt werden auf physikalische Stromlieferungen. Dies ist technisch schwierig, aber andererseits ist davon auszugehen, dass vom Erwerb sog. RECs (Renewable energy certificates) in ihrer derzeitigen Form keine oder kaum CO₂-reduzierende Wirkung ausgeht. Der so zertifizierte Strom wird ohnehin erzeugt. Durch RECs in bisheriger Form sind weder Kapazitätserhöhungen zur CO₂-armen Stromerzeugung garantiert, noch kann garantiert werden, dass so

zertifizierter Strom in Hessen tatsächlich zum Verbrauch gelangt. Der Wert derartiger Zertifikate ist in Signalwirkung zu sehen. Mehr hierzu in Abschnitt 3.

2.3 Weiterer Aspekt

Biogas wird aus Biomasse gewonnen und dient über seinen Methananteil überwiegend zur Erzeugung von elektrischem Strom, der in das allgemeine Leitungsnetz eingespeist wird. Dazu wird das Methan aus dem Biogas je nach Verwendungszweck mehr oder weniger sauber abgetrennt. Die energetische Nutzung besteht darin, dass Methan grundsätzlich zu einer gleich großen Menge Kohlendioxid verbrannt wird: $\text{CH}_4 + 2 \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2 \text{H}_2\text{O}$. Allerdings muss die chem. Umformung (Gärung) von Biomasse beeinflusst werden, um möglichst viel Methan zu erzeugen. Die bei der Methanverbrennung entstehende Abwärme kann zusätzlich zu Heizzwecken genutzt werden (Blockheizkraftwerke).

Methanverbrennung führt zunächst zu einer Erhöhung von CO_2 -Emissionen. Eine mindestens so große CO_2 -Menge wurde der Atmosphäre aber nur wenige Monate oder Jahre vorher beim Biomasseaufbau entzogen. In einer Gesamtrechnung der Treibhausgasbelastung ist die Methanverbrennung nur sinnvoll abbildbar, wenn auch neben CO_2 auch Methan (und Lachgas) erfasst werden. Dies ist jedoch aktuell für die hess. CO_2 -Strategie nicht vorgesehen. Darüber hinaus liegen Schwierigkeiten darin, dass die Methanverbrennung in Biogasanlagen unvollständig sein kann, d. h. Methan entweicht in die Atmosphäre und dass evtl. fossile Energieträger und CO_2 -emittierende Verfahren (ggf. Düngung, Aufbereitung des Biogases) zur Biomasseerzeugung eingesetzt werden. Letzteres variiert stark mit dem Typ der verwendeten Biomasse.

Insgesamt wird für die Stromgewinnung aus Biogas eine CO_2 -Belastung angegeben, die deutlich unter dem deutschen Strommix liegt, siehe Abbildung 2.5 für fünf reale, anonymisierte Biogasanlagen [BaGr]. Die CO_2 -Emissionen der Stromerzeugung aus Biomasse liegen oberhalb der von Wind- und Solarstrom,

allerdings ist die Stromerzeugung aus Biomasse grundlastfähig, d. h. steht ständig zu Verfügung.

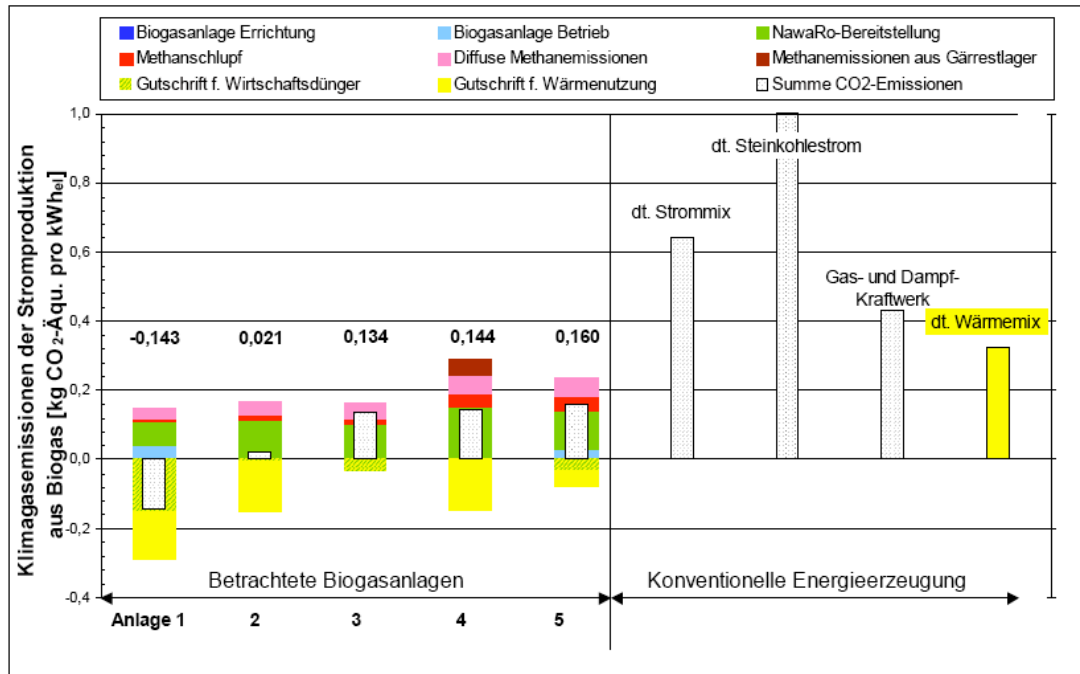


Abbildung 2.5: Emissionen ausgesuchter Biogasanlagen. Negative Werte (gelb) im linken Teil der Grafik stellen rein rechnerische Größen dar.

Die reine CO₂-Analyse von Biogasnutzung ist losgelöst von der kritischen Frage, ob Biomasse z. B. aus Gülle, landwirtschaftlichen Abfällen oder speziellen Energiepflanzen wie „Elefantengras“ gewonnen wird. Bei letzterem besteht die Gefahr der Verdrängung von Nahrungspflanzen.

3. Zu Kompensation

3.1 Hintergrund

Die Ausgangsfrage lautet: Gibt es CO₂-Neutralität überhaupt? Die Antwort lautet: Im Prinzip ist Klimaneutralität möglich. Sie ist aber unter heutigen Bedingungen nur schwer nachzuweisen. Das könnte sich in den nächsten Jahren ändern.

Viele Lebensvorgänge und chemische Prozesse sind mit Klimagasemissionen verbunden. Die Natur ist in der Lage, einen bestimmten Umfang derartiger Emissionen zu puffern. Das Volumen liegt deutlich oberhalb von 10 Mrd. Tonnen CO₂-Emissionen pro Jahr, was auch für die Zukunft ein durchschnittliches CO₂-Emissionsniveau von 1 Tonne pro Person und Jahr in unproblematischer Weise ermöglicht. Die Absorption erfolgt hauptsächlich über terrestrische Vegetation und ergänzend über die Meere [PK]. Es ist daher kein gesellschaftliches Ziel, eine Welt ohne Klimagasemissionen zu schaffen. Klimaneutralität als Begriff bezieht sich insofern nicht auf eine Welt ohne Klimagasemissionen. Die Frage ist vielmehr, was die Welt im Steady-State aushält und welche humanen und sonstigen, nicht mit Problemen behafteten Prozesse das vorhandene Volumen möglicher Emissionen ausschöpfen [HMU].

Im Besonderen dann, wenn die Volumina an von Menschen erzeugten Klimagasemissionen das Zulässige überschreiten, stellt sich die Frage, wer das Problem ist, wer welche Verantwortung übernimmt und wer Einsparungen erbringt. Letztlich geht es um das kluge Management eines Weltgemeingutes, eines sogenannten Global Common.

Ein Standardweg einer nachhaltigen Bewirtschaftung von Gemeingütern ist eine Zuteilung von Eigentumsrechten und die damit verbundene Übertragung von Verantwortung. Hilfreich sein können in diesem Kontext Branchencodes für die Wirtschaft [Gra] als Flankierung von Prinzipien der Corporate Social Responsibility. Im Klimabereich könnte die Basis die Etablierung eines globalen

Cap und Trade-Systems für den Klimasektor sein. Zu klären ist, welche Volumina pro Jahr zur Verfügung stehen und wie diese Volumina verteilt werden. Solange entsprechende Vereinbarungen fehlen, bleiben nur Ersatzlösungen: individuelles Sparen oder der Versuch, sich klimaneutral zu positionieren.

Auch unter einem globalen Cap und Trade-System ist individuelles Sparen angesagt, vor allem, wenn die Caps jährlich sinken. Und auch dann kann z. B. aus ethischen Gründen Klimaneutralität ein Thema sein. In diesem Fall müsste der Gesamtumfang von Emissionen, also das Cap, in dem Maße reduziert werden, wie man selber Klimagasemissionen erzeugt (ggf. könnte man hier 1 Tonne pro Jahr aufgrund der oben gegebenen Hinweise abziehen, aber auf diese Art der Verrechnung wird hier verzichtet, da bisher keine weltweit akzeptierte Verteilung dieses Potentials erfolgt ist).

Muss für Klimagasemissionen kompensatorisch bezahlt werden, müsste doppelt gezahlt werden: einmal zum Tätigen der eigenen Emissionen und dann zur Verringerung des weltweiten Cap um jeweils denselben Umfang. Die eigenen Emissionen haben dann auf keinen Fall einen negativen Effekt. Selbst dann, wenn die Menschheit zuviel Emissionen erzeugt, selbst dann, wenn es kein weltweites Cap (von akzeptabler Höhe) gibt, ist Klimaneutralität möglich, wenn nämlich nachweislich ohne das eigene Tun der entstehende Gesamtumfang an Emissionen identisch oder gar größer wäre als der Gesamtumfang unter Einschluss der eigenen Aktivitäten. Dann ist das eigene Tun neutral oder wirkt sogar erleichternd, weil ja anschließend die Gesamtemissionen mindestens um das Volumen der selbstinduzierten Emissionen reduziert werden. Dabei sind alle direkten und indirekten eigenen Emissionen einzubeziehen.

Wo kann man beim Sparen von Klimagasen ansetzen?

Generell ist eine Einschränkung der eigenen Aktivitäten, des eigenen Konsums ein Sparansatz: weniger Heizen, weniger Reisen, weniger Fleischkonsum. Ein zweiter Ansatz ist eine erhöhte Effizienz der Energienutzung. Dasselbe tun wie

vorher, aber mit weniger Energieaufwand, also intelligenter. Ein weiteres Element sind, drittens, alternative Arten der Energieerzeugung, z. B. Ökostrom, Solarenergie, Geothermie, wobei ehrlicherweise immer mitbedacht werden muss, wie viel Vorinvestitionen energetischer Art zu leisten sind, bevor man Energie einsparen oder klimafreundlicher erzeugen kann als vorher (eine interessante Maßzahl ist in diesem Kontext der Energy Return on Investment, so genannter EROI [BalHaMu]). Der einfachste Weg, in Richtung Klimaneutralität zu operieren, betrifft die Nutzung von Zertifikaten.

3.2 Sind Zertifikate überhaupt wirksam?

Es gilt „Fallstricke“ zu vermeiden, insbesondere irreführende Vorstellungen darüber, was mit Zertifikaten erreicht werden kann. Im Folgenden werden fünf Typen von Zertifikaten unterschieden.

(1) Renewable Energy Certificates

Mittels Renewable energy certificates (RECs) kauft man gedanklich Strom z. B. aus einem Wasserkraftwerk in Norwegen. Mit derartigen Zertifikaten wird dabei die weitgehende Klimaneutralität der Stromerzeugung dem Käufer gegen (vergleichsweise geringe) Zahlung zugeschrieben. In der Regel wird nicht genau dieser Strom den „Besitzer dieser Neutralität“ erreichen, es ist eher eine „virtuelle Zuordnung“. Allerdings ist die Stromproduktion von der Zertifikatsausgabe unbetroffen. Oft ist die Ausgabe von Zertifikaten ein Mitnahme-geschäft für die Produzenten. Nur insofern, als in prekären Grenzbereichen der Finanzierung des Wasserkraftwerks der Zertifikateverkauf des betrachteten Unternehmens die Existenz eines solchen Kraftwerks sichert, wird ein additiver Effekt in Richtung Klimaneutralität bewirkt.

Bis dato ist es allerdings nicht möglich, RECs-Strom zur Erreichung nationaler Klimaziele anzurechnen. Im Rahmen einer zukünftigen, EU-weiten Handelsplattform für Herkunftsnachweise der Stromerzeugung kann dies aber möglich werden. Hierzu ist vorgesehen, dass regenerativ erzeugter Strom aus Anlagen, die ab 2012 in Betrieb gehen, grundsätzlich anrechenbar wird. Details des

Handels mit Herkunftsnachweisen befinden sich im Klärungsprozess (Quelle: Interview mit RECs Deutschland e.V., Hamburg). Mit dieser RECs Modifikation würde ein gewisser Anreiz geschaffen, die Kapazitäten zur regenerativen Stromerzeugung zu erhöhen.

Zu Ende gedacht stelle man sich eine Gesellschaft vor, in der ein Drittel des Stroms klimafreundlich und zwei Drittel des Stroms auf fossiler Basis generiert werden. Man nehme weiterhin an, dass 20 % Prozent der gesellschaftlichen Akteure unter kritischer öffentlicher Beobachtung einem öffentlichen Druck in Richtung 100 % Green Corporate Social Responsibility / Klimaneutralität ausgesetzt sind. Diese könnten sich gegen eine überschaubare Gebühr zu 100 % klimaneutral produzierten Strom zuschreiben lassen (sie würden dann 60 % dieses Stroms bei sich allokalieren). In der Optik sieht das gut aus, in der Sache ist der Mix aber derselbe wie vorher – nichts ist passiert. Nur, dass jetzt bei den nicht unter Beobachtung stehenden 80 % an gesellschaftlichen Akteuren der Anteil des klimafreundlichen Stroms in dem gegebenen Mix von 1:2 auf 1:5 absinkt. Erst dann, wenn die Nachfrage nach klimaneutralem Strom die ohnehin schon vorhandenen Potentiale bzw. deren Zurechenbarkeit überschreiten (im obigen Beispiel statt 20 % mehr als 33,3 %), würde von diesen Zertifikaten ein Marktdruck in Richtung auf mehr Klimafreundlichkeit ausgehen.

(2) EU-Zertifikate

Hochwertige Zertifikate sind die Zertifikate des EU-Klimaregimes. Sie sind individuell eindeutig identifizierbar und für Klimaneutralitätsmaßnahmen gibt es ein Stilllegungsregister. Die Verwaltungskraft der EU und ihrer Nationalstaaten wird in der Umsetzung wirksam. Auch diese Zertifikate haben aber ein Problem, das sog. Carbon Leakage.

Entzieht man dem Markt Zertifikate durch Stilllegung, geht der Zertifikatspreis hoch (intendierte Wirkung). Dann kann es sein, dass sich dann bestimmte Produktionen innerhalb der EU nicht mehr rechnen, weil die verkraftbaren

Grenzkosten überschritten werden. Es gibt dann die legal zulässige Möglichkeit des Carbon Leakage. Energieintensive Produktionen werden aus der EU heraus verlagert, ersatzweise finden Erneuerungs- und Erweiterungsinvestitionen außerhalb der EU statt. Im ungünstigsten Fall wird wegen lascher Standards am neuen Standort mehr CO₂ emittiert als zuvor am alten innerhalb der EU. Eine fundierte Untersuchung findet sich in [UBA], auch mit Bezug auf parallele Untersuchungen für die Niederlande und Großbritannien. Als kritische Bereiche für ein eventuelles Carbon Leakage werden Produkte mit hohem Energieanteil und großer Handelsintensität identifiziert (z. B. Aluminium, Metalle, chemische Düngemittel, Zement etc.).

Die Studien machen deutlich, dass es das Carbon Leakage Problem gibt. Gegenmaßnahmen sind schwierig. Auch die kostenfreie Zuteilung von Zertifikaten an entsprechende Betriebe löst das Problem nicht. Die Unternehmen sind dann nämlich über den Markt gehalten, die entsprechenden Zertifikatskosten einzupreisen. Gegenmaßnahmen vom Typ Grenzausgleichsabgaben sind unter WTO-Bedingungen ein schwieriges Thema [Sel]. Wünschenswert wäre ein internationales Abkommen [Ra].

Insgesamt erscheint das Phänomen nicht ganz die Dimension zu haben, die von manchen befürchtet wird. Mit einem Instrument vom Typ EU-Zertifikate ist dann aber ein weiteres Problem verbunden, nämlich die intendierte und erfolgende weitere Absenkung der insgesamt nutzbaren Emissionsrechte, potentiell unter ein wie auch immer definiertes Cap. Das kann negative Preiseffekte zur Folge haben.

(3) Clean Development Mechanismus

Der Clean Development Mechanism des Kyoto-Protokolls ist ein Instrument zur Förderung von Kooperation zwischen Nord und Süd unter Bedingungen unterschiedlicher Restriktionen zwischen Industrieländern und anderen Staaten im Kyoto-Vertrag. Es ist der innovativste Mechanismus des Kyoto-Protokolls. In gemeinsamen Projekten, die von UN-Seite zu genehmigen sind, können Nord

und Süd vor Ort im Süden in Projekten zusammenarbeiten, die Klimagasemissionen vor Ort verringern oder Zuwachs in bestimmten Lokationen ganz oder teilweise vermeiden, wobei dem Partner des Nordens Klimarechte gutgeschrieben werden.

Eine entscheidende Anforderung von UN-Seite ist Additionalität. Es darf sich also nicht um klimafreundliche Maßnahmen handeln, die auch ohne diese Form der Kooperation erfolgen würden.

In diesem Sinne wird dann auch ein tatsächlicher Klimaschutzeffekt erreicht. Das steht nicht im Widerspruch zu weltweit insgesamt wachsenden CO₂-Emissionen. Der Punkt ist, dass anderenfalls das Wachstum noch höher gewesen wäre. Die Qualität entsprechender Zertifikate hängt über die Genehmigung durch die UN hinaus im Einzelfall an der Sinnhaftigkeit und Qualität des konkreten Projektes. Hier geht es unter Umständen auch um das Erreichen weiterer Dimensionen der Nachhaltigkeit, z. B. Adressierung welt-sozialer Fragen. Will ein Akteur wie die Landesverwaltung Hessen klimaneutral operieren, empfiehlt sich, bei Verfolgung eines CDM-Ansatzes, die Organisation entsprechender Projekte unter eigener Kontrolle, damit man die Verantwortung bezüglich der zu erreichenden Effekte übernehmen und sicherstellen kann, dass gesetzte Ziele erreicht werden.

Der Kyotovertrag läuft 2012 aus. Die Staaten der Welt überlegen, wie ein Anschlussvertrag aussehen wird. Es ist denkbar, dass es CDMs in bisheriger Form nicht mehr geben wird.

(4) Aufforstungsprojekte und echte Klimaneutralität

Aufforstung ist eine Möglichkeit, CO₂ zu binden und zusätzliche Nachhaltigkeitseffekte zu erschließen. Im Lebenszyklus der Bäume wird CO₂ gebunden, dann aber auch wieder freigegeben. Es handelt sich also um einen temporären Effekt, es sei denn, die Waldfläche wird auf Dauer vergrößert; dann bleibt der erzielte Effekt in der Größenordnung der Erweiterung der Gesamtwaldfläche

als Einmaleffekt. Es ist allerdings schwierig, den Erhalt entsprechender neu bepflanzter Flächen über einige Jahrzehnte zu sichern.

Positiv für derartige Zertifikate wirkt sich aus, dass die Menschheit im Moment unter einem enormen Zeitdruck bzgl. der Absenkung der Klimagasemissionen steht. Legt man die WGBU-Budgetbedingung [WBGU] zugrunde, dürfen in 2010-2050 akkumuliert nur noch 750 Milliarden Tonnen CO₂ in die Atmosphäre entlassen werden. Berechnungen zeigen, dass dazu die weltweiten Emissionen bis 2025 von heute etwa 30 Milliarden Tonnen auf unter 20 Milliarden Tonnen pro Jahr sinken müssen, vgl. die Sollkurve in Abbildung 3.1.

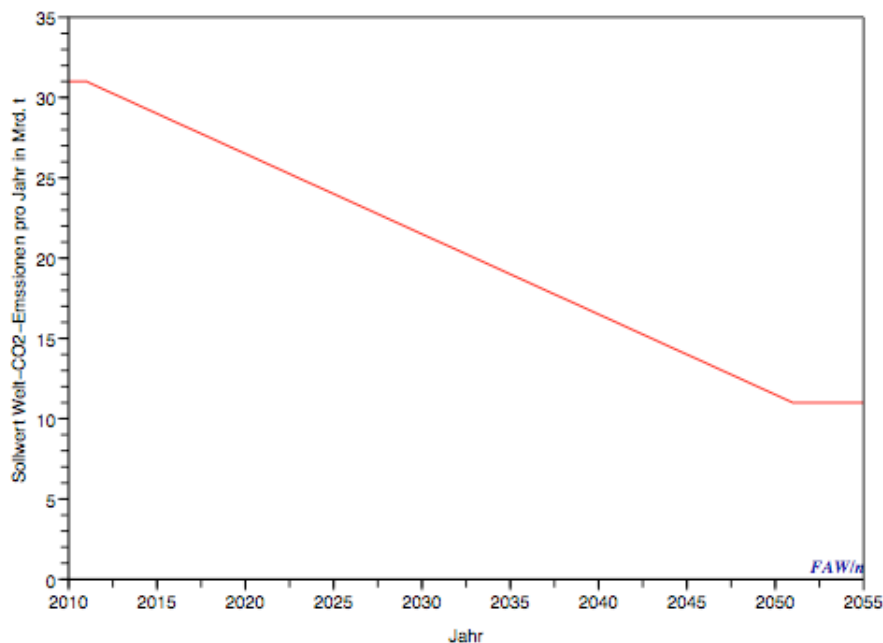


Abbildung 3.1: Sollkurve globaler CO₂-Emissionen in Mrd t pro Jahr.

Das ist nicht erreichbar. Das temporäre Binden von CO₂ ist in dieser kritischen Situation als Brückenmaßnahme der Schlüssel zu einer umsetzbaren Lösung.

In [Ra] wird deshalb vorgeschlagen, im Zeitraum 2013-2032 ein forciertes Weltaufforstungsprogramm zu realisieren. Im Endausbau sollen dabei Aufforstungen auf 500 Millionen Hektar (= 5 Mio. Quadratkilometern) Fläche, z. B. Savannen, Steppen etc. erfolgen und im Endausbau pro Jahr mindestens 5 Milliarden Tonnen CO₂ binden. Dies ist eine nur einmal nutzbare Option für die

Menschheit. Der Steady State-Zyklus der Bewirtschaftung umfasst mindestens 40 Jahre. Einmalig gebunden werden so mindestens 200 Milliarden Tonnen CO₂. Mit dieser Maßnahme wird bei richtiger Vorgehensweise die WBGU-Budgetrestriktion umsetzbar.

Dieses Vorgehen fällt in die Kategorie Global Green New Deal, weltweite Öko-soziale Marktwirtschaft und Global Marshall Plan. Es adressiert alle Dimensionen der Nachhaltigkeit, vor allem, da die Umsetzung primär in südlichen Ländern Erfolg verspricht. Es ist strikt additiv auf Bindung von CO₂ angelegt, soll also keine zusätzlichen (Netto-)CO₂-Emissionen an anderer Stelle erlauben.

In [Ra] wird vorgeschlagen, dieses Weltaufforstungsprogramm primär von Organisationen, Unternehmen und Privatpersonen finanzieren zu lassen, die ihre eigenen Aktivitäten klimaneutral stellen wollen. Vor diesem Hintergrund bieten Aufforstungsprojekte, vor allem wenn sie in dem beschriebenen internationalen Rahmen umgesetzt werden, einen idealen Ansatzpunkt für Klimaneutralität.

(5) UN-Zertifikate und echte Klimaneutralität

Höchste Qualität haben Zertifikate in einem rigiden globalen Cap und Trade-System, das die Möglichkeit der Neutralisierung explizit anbietet und Phänomene wie Carbon Leakage ausschließt. Aus Sicht der aktuellen FAW/n-Analyse [Ra] bestehen Chancen, in der richtigen Fortentwicklung des Copenhagen Accord in Verbindung mit einer Kapitalisierung BIP-relativer Emissionszuwachsrechte von Ländern wie China und Indien und in einer adäquaten Adressierung der WTO- Möglichkeiten innerhalb weniger Jahre international zu einem derartigen System zu kommen.

Allerdings werden derartige Systeme mit den vorgesehenen Reduktionen an weltweiten CO₂-Umfängen an die Grenzen dessen gehen, was mit Blick auf eine gedeihliche Entwicklung der Weltökonomie, erwünschtes Wachstum und Überwindung der Armut verkraftbar ist. Es wird also kaum Raum sein, zusätz-

liche Potentiale für Klimaneutralität anzubieten. Insofern wird eine Lösung für Klimaneutralitätsanliegen über UN-Zertifikate nur dann angeboten werden können, wenn die Staaten der Welt sich nicht über freiwillige Selbstverpflichtungen und Querfinanzierungsmaßnahmen auf das für Klimastabilität erforderliche enge Emissionscap verständigen können. Dann wird man versuchen, zulässige, überschüssige Emissionsvolumina über unterschiedliche Formen der Neutralisierung stillzulegen.

(6) Wer trägt im Rahmen von Klimaneutralität die Kosten?

Im Rahmen eines Zertifikatehandels, insbesondere bei gesetztem und durchgesetztem Cap, betrachtet man am einfachsten den Fall, in dem alle Interessenten zu Stichtagen Zertifikate erwerben. Zu zahlen ist dann der bei dieser Nachfrage entstehende Preis. Je mehr Wünsche nach Klimaneutralität auftreten, desto höher wird der Preis sein, da auf diese Weise das Cap an Klimagasemissionen dauernd verringert wird. Es zahlen also (1) diejenigen, die klimaneutral sein wollen, in Höhe der sich jeweils einstellenden Zertifikatspreise und (2) die Weltgemeinschaft in Form höherer Zertifikatspreise. Der zweite Kostenteil wird dabei in der Regel deutlich höher sein als der erste. Deshalb wird die Weltgemeinschaft Klimaneutralitätsbemühungen auf dieser Basis nur in dem Umfang zulassen, wie sich die Staaten noch nicht auf ein genügend enges Klimaregime verständigt haben. Umgekehrt ist bei wachsendem Zertifikatspreis zu erwarten, dass immer weniger Organisationen, Unternehmen oder Privatpersonen Klimaneutralität anstreben werden bzw. können.

(7) Weitere CO₂-Neutralisierungsangebote

Heute bereits kommerziell verfügbare Kompensationsangebote liegen bei Preisen von €10/t bis €30/t CO₂, wobei der Preis in vielen Fällen oberhalb von €20/t liegt. Die Angebote umfassen sowohl Aufforstungen als auch Effizienzvorhaben wie z. B. den Ersatz eines Dieselgenerators durch eine Photovoltaikanlage. Bei beiden Projekttypen erfolgt die Kompensation nicht zeitnah, son-

dern etwa 10 und mehr Jahre nach Emission. Die Mehrzahl der heute angebotenen Kompensationsprojekte sind Effizienzprojekte, die in niedrig entwickelten Ländern durchgeführt werden und idealerweise den inzwischen verbreiteten Goldstandard erfüllen, siehe www.cdmgoldstandard.org.

Die Kompensationskosten richten sich u. a. nach Aspekten, die über CO₂-Einsparung oder gar CO₂-Extraktion aus der Atmosphäre hinausgehen, wie lokale Akzeptanzanalysen, Schaffung von Arbeitsplätzen vor Ort und Monitoring. Bei allen Kompensationsmaßnahmen ist davon auszugehen, dass in einem gewissen, nur schwierig zu ermittelndem Umfang Carbon Leakage auftritt.

Weiterhin ist bei Kompensation der Emissionsort relevant. Bei der Kompensation von Flugemissionen ist die stärkere Klimawirkung von Emissionen in großen Höhen - im Vergleich zu bodennahen Emissionen - zu berücksichtigen. Die Klimabeeinträchtigung in großen Höhen wird mittels des Radiative Forcing Index RFI ausgedrückt [Fu]. Dessen Werte schwanken und werden oft mit 2,5 angenähert, d. h. 1t CO₂-Emissionen in Flughöhe wird wie bodennahe 2.5t CO₂-Emissionen behandelt. Kommerzielle Kompensationsanbieter berücksichtigen den RFI in der einen oder anderen Form.

Eine kostengünstige Option der CO₂-Neutralisierung besteht beim Güterverkehr und im Personenverkehr für Großkunden der Deutschen Bahn. Im hier relevanten Personenbereich erhöhen sich Fahrpreise um ca. 0,5%. Dabei wird die CO₂-Neutralisierung durch Einspeisung von Fahrstrom aus erneuerbaren und lokalen Energiequellen angestrebt. Es wird somit auf separate Kompensationsvorhaben verzichtet.

Sofern ein Verbraucher CO₂-Kompensation durchführen möchte, kann er dies durch eigene Maßnahmen anstreben, wie bei Flügen, oder er kann sich ggf. „anbieterseitigen“ Maßnahmen anschließen. So werden Kompensationsprojekte u. a. von Verlagen, Event-Agenturen und Energieversorgern durchgeführt. Für Stromanbieter ergibt sich bei CO₂-Emissionen von 572 g/kWh, vgl. Kapitel

1, und einem Kompensationspreis von €20/t eine rechnerische Strompreiserhöhung von ct 1,15/kWh. Dieser Preis liegt deutlich über dem von RECs, s. o. Für Gasanbieter ergibt sich bei CO₂-Emissionen von 202 g/kWh, vgl. wieder Kapitel 1, eine entsprechende Preiserhöhung von ct 0,4/kWh. Allerdings geben beispielsweise die Stadtwerke Kassel, die CO₂-Neutralstellung von Gas anbieten, die Mehrkosten - nach eigener Darstellung - nicht an Kunden weiter.

3.3 *Situation Hess. Landesverwaltung*

Der generell empfohlene Ansatz lautet Doppelstrategie. Für diesen hat sich z. B. explizit das Land Baden-Württemberg in seiner Energie- und Klimastrategie entschieden [NBBW1, NBBW2]. In diesem Ansatz wird vor Ort alles getan, was sich ökonomisch darstellen lässt, z. B. gemäß den in Hessen gewählten Elementen Reduktion und Substitution. Parallel erfolgt ein Engagement in internationalen Lösungen (Kompensation). Es geht dabei nicht um reine Preisbetrachtungen. Bei möglichen Zertifikatspreisen von €10-20 pro Tonne CO₂ könnte das Land Hessen die Klimaneutralität seiner Landesverwaltung mit Aufwendungen von max. €12 Millionen pro Jahr erfüllen.

Bei der Waldoption bezieht sich das aber nur auf die Nutzung eines einmal verfügbaren „Fensters“ für die Menschheit. Parallel dazu muss aber der Umbau der Industriegesellschaft und eine neue Form von Entwicklung bis 2050 weit fortgeschritten sein. Auch aus Gründen der weltweiten sozialen Balance müssen sich hier alle Staaten am Umbau beteiligen und gemeinsam die Kosten für diesen Umbau aufbringen. Es ist zu begrüßen, dass das Land Hessen genau dieses tut.

Letztlich ist es eine politische Entscheidung, wie viele Finanzmittel in welchem Bereich allokiert werden. In einer groben Annäherung ist eine Reduktion der Emissionen im Lande um 50 % angemessen; der Rest ist dann ein Thema des Zertifikatekaufs im Kontext tatsächlicher Neutralisierung.

Die genaue Aufteilung ist auch eine Frage von Grenzelastizitäten, wobei die 50:50-Aufteilung dabei zu bestimmten Szenarioannahmen korrespondiert, die bei Bedarf weiter zu detaillieren sind, vgl. [Ra]. Bei einer Reduktion und Substitution der in und durch Gebäude verursachten Emissionen von 395 000 t auf 223 300 t (vgl. Abschnitt 2) ergibt sich zur Neutralisierung nur dieser Emissionen eine Aufteilung von 56:44 zu „Gunsten“ von Kompensation.

3.4 Empfehlung

Dem Land Hessen wird empfohlen, entlang der bisherigen Überlegungen weiter zu operieren. Aktuelle Festlegungen bzgl. Zertifikatekauf sollten nur temporären Charakter haben, um die in einigen Jahren hoffentlich vorhandenen Möglichkeiten zu vollumfänglicher Klimaneutralität, möglicherweise im Kontext eines weltweiten Weltaufforstungsprogramms, uneingeschränkt ausschöpfen zu können.

Im Sinne einer doppelstrategischen Ausrichtung auf globale Nöte scheint es uns auch wichtig, die aus der nach Kopenhagen und Cancún gewählten Positionierung von China, Indien und weiteren großen Staaten resultierenden Potentiale richtig zu adressieren und zu kommunizieren und aktiv in die politische Forderung eines weltweiten Aufforstungsprogramms zu investieren. Das sollte fester Bestandteil der Argumentation für ein klimaneutrales Hessen werden.

In diesem Zusammenhang sollten auch indirekte Lösungen seitens der Hess. Landesverwaltung erwogen werden. Dabei handelt es sich um Produkte und Dienstleistungen, die bereits CO₂-neutral gestellt bzw. als solches angeboten werden. Beispiele sind Emissionsneutralisierung von Kraftstoffen, Erdgas, Strom und von Reisen. Hier stellt sich überwiegend ebenso ein Kompensationsproblem und es ist im Einzelfall zu hinterfragen (1) wie die CO₂-Neutralisierung anbieterseitig angestrebt wird und (2) ob die angebotene Option plausibel ist. Letzteres dürfte z. B. bei der CO₂-Neutralstellung von Strom über den aktuellen Emissionsmix hinaus aufgrund der Offenheit der Versorgungsnetze schwierig werden.

Die ökonomische Bewertung von eigenen und der o. a. indirekten Kompensationsoptionen erfolgt typischerweise gemäß CO₂-Vermeidungskosten. Hierbei ist zu beachten, dass nicht nur Zertifikate sondern auch die damit verbundenen, realen Kompensationsmaßnahmen häufig mit Leakage-Problemen verbunden sind. D. h. es besteht – zumindest aus heutiger Sicht – eine gewisse Unsicherheit über die Höhe und den zeitlichen Verlauf von Emissionsminderungen. Hier sind Prüfungen vorzunehmen, wobei man erwarten kann, dass dazu u. a. künftig allgemein verfügbares Erfahrungswissen vorliegen wird. Dies betrifft ebenso die CO₂-Vermeidungskosten selber, und zwar entlang der gesamten Kette von CO₂-Neutralisierungsmaßnahmen.

Offensichtlich sind die CO₂-Vermeidungskosten für alle drei Strategieelemente Reduktion, Substitution und Kompensation ein zentraler Indikator. Wegen der großen Kostenunterschiede etwa zwischen Reduktions- und Kompensationsmaßnahmen sind die CO₂-Vermeidungskosten besonders relevant für den Vergleich von Maßnahmen innerhalb jedes der drei Strategieelemente. Dabei gilt, dass CO₂-Vermeidungskosten typischerweise „Paketpreise“ sind.

Jenseits von CO₂-Vermeidungskosten liegen Vorbildfunktion und die Schaffung weiterer CO₂-Neutralisierungsmaßnahmen durch die frühzeitige Nachfrage seitens der öff. Hand. Der durch das Land Hessen eingeschlagene Vorstoß sollte konsequent fortgeführt werden.

4. Ausblick

Es ist absehbar, dass CO₂-Neutralität der Hessischen Landesverwaltung innerhalb von 20 Jahren nur mittels Kompensation erreichbar ist. Dies ist nicht anders zu erwarten und befindet sich im Einklang mit ähnlichen Vorhaben. Somit stehen Detailbewertungen von Kompensationsalternativen und entsprechende Zeitplanungen an. Kompensation, insbesondere deren Qualität und ethische Platzierung, muss in den Überlegungen der Landesverwaltung eine große Rolle spielen. Unter Empfehlungen wurden in 3.4 einige Hinweise gegeben, was aus unserer Sicht geschehen könnte.

Zumindest für jedes größere Kompensationsvorhaben sollte eine externe Qualitätsbewertung vorgenommen werden bzw. vorliegen. Für letzteres gibt es bereits heute eine Vielzahl von Zertifikatstypen. Für freiwillige Kompensationsvorhaben, die sich z. B. außerhalb des Kyotoprotokolls bewegen, liegen zudem diverse Formen von Verifikaten (sog. VERs) vor, die umgangssprachlich auch unter Zertifikate fallen.

Sofern man sich bei der Qualitätsbewertung von Kompensationsmaßnahmen auf Zertifikate bzw. Verifikate beruft, sind auch Eigeninteressen von Zertifizierern bzw. Verifizierern abzuschätzen. Ein hohes Zertifikatsniveau ist wegen der damit verbundenen Begründbarkeit von Ausgaben sinnvoll – über die Sinnhaftigkeit von CO₂-Kompensationsmaßnahmen hinaus.

Anhang A

Aktuelle Detailanalyse; vgl. Abschnitt 1.3

Aktuell steigt der Stromverbrauch pro Fläche mit der Liegenschafts-/Gebäudegröße, siehe Abb. A.1. Dies ist zu erwarten, da mit der Gebäudegröße generell auch die Haustechnik aufwendiger wird. Die folgenden Regressionen basieren auf Daten des Hessischen Baumanagements [HBM].

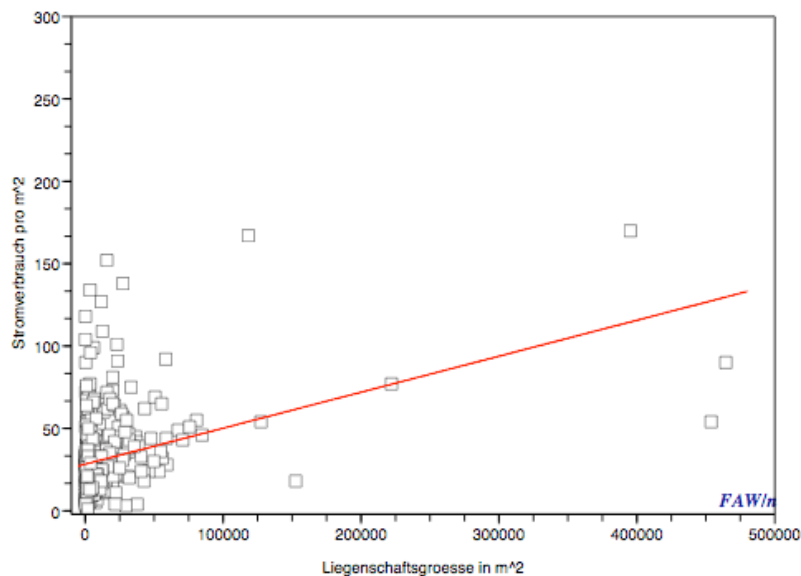


Abbildung A.1: Lineare Regression des Stromverbrauchs pro m² als Funktion der Liegenschaftsgröße auf Basis von 549 Datenpunkten.

Auch der Wärmeverbrauch pro Fläche steigt mit der Liegenschafts-/Gebäudegröße, siehe Abb. A.2. Dies ist nicht unbedingt zu erwarten, denn, zumindest bei günstigen Verhältnissen von Gebäudefläche zu -volumen („A/V-Verhältnis“) könnte eine Abnahme vermutet werden.

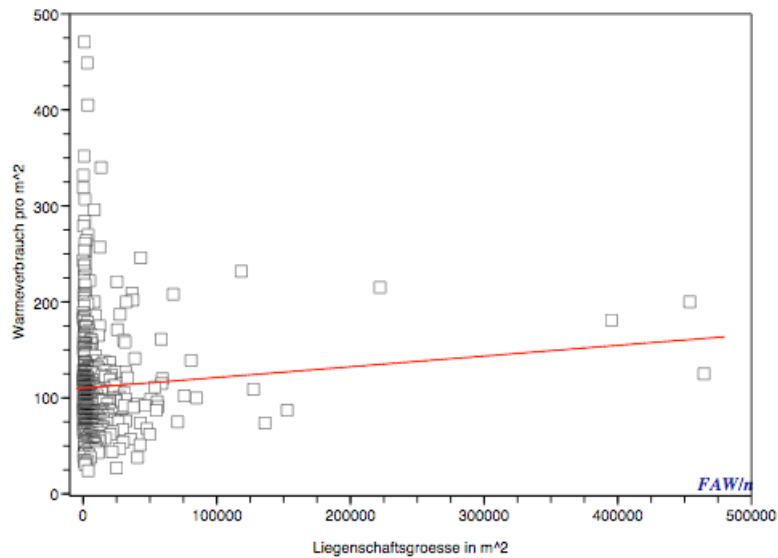


Abbildung A.2: Lineare Regression des Wärmeverbrauchs pro m^2 als Funktion der Liegenschaftsgröße auf Basis von 555 Datenpunkten.

Sowohl beim Strom- als auch beim Wärmeverbrauch kann der Eindruck entstehen, dass die wenigen großen Liegenschaften einen dominanten Einfluss auf die Zu- bzw. Abnahme ausüben. Der Befund sieht dann auch etwas anders aus bei Beschränkung auf Liegenschaften unter $100\,000\,m^2$. Der Stromverbrauch pro Fläche bleibt steigend, siehe Abb. A.3, während der Wärmeverbrauch pro Fläche mit zunehmender Liegenschafts-/Gebäudegröße fällt, siehe Abb. A.4.

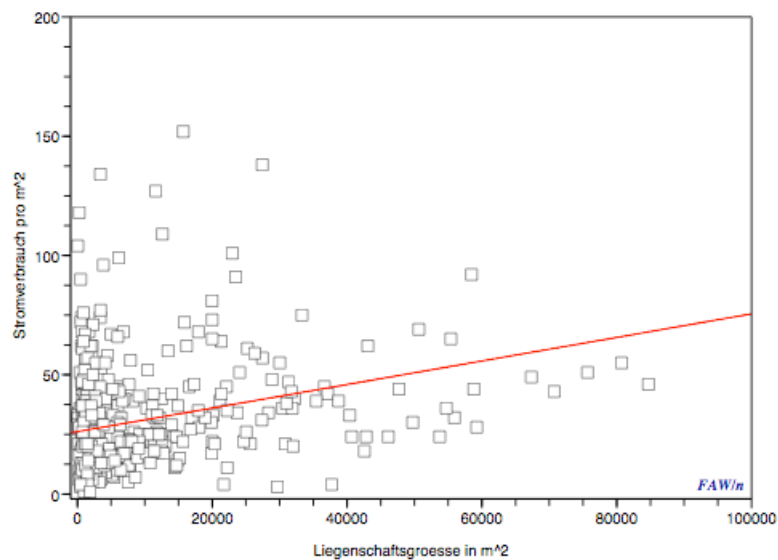


Abbildung A.3: Lineare Regression des Stromverbrauchs pro m^2 als Funktion der Liegenschaftsgröße $< 100\,000\,m^2$ auf Basis von 542 Datenpunkten.

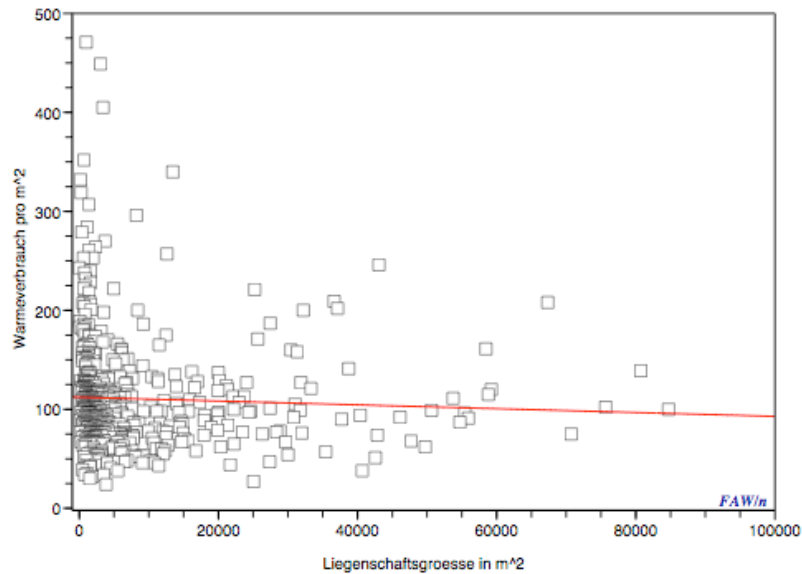


Abbildung A.4: Lineare Regression des Wärmeverbrauchs pro m^2 als Funktion der Liegenschaftsgröße $< 100\,000m^2$ auf Basis von 547 Datenpunkten.

Die Vermutung könnte nahe liegen, dass es eine optimale Gebäudegröße gibt, bei der Strom- und Wärmeverbrauch zu geringsten Emissionen pro Fläche führen. Dies kann aber für den vorliegenden Gebäudebestand auf Basis der vorliegenden Daten nicht bestätigt werden. Nach Rücksprache mit dem Passivhausinstitut kann dies auch nicht für Neubauten nach dem Passivhausstandard o. ä. erwartet werden; auch nicht für eine vermeintlich homogene Gruppe von Gebäuden wie Verwaltungsgebäuden. Es ist nicht bekannt, dass es eine energetisch optimale Gebäudegröße gäbe.

Hingegen sollte auf Einzelfallbasis geprüft werden, ob hier ein Artefakt der Verbrauchsdaten vorliegt, da die Daten der großen Liegenschaften nicht gebäudeweit aufgelöst sind, oder ob es sich um einen substantiellen Effekt handelt. Im ersten Fall sollte die Datenerhebung im Interesse von CO_2 -Bilanzierungen möglichst feiner aufgelöst werden. Im zweiten Fall liegt es sehr nahe, dass energetische Sanierung oder energiegünstiger Neubau bei den großen Liegenschaften pro Fläche zu übergroßen Energie- und Emissionsreduktionen führen.

Anhang B

Optimierungsansätze zur Prioritätensetzung für CO₂ Reduktion bei Bauten; Emissionsminimierung bei vorgegebenen Maximalkosten; vgl. Abschnitt 1.4

Die konkrete Priorisierung von energetischen Sanierungs- und Neubaumaßnahmen kann hier nicht vorgenommen werden, es können aber entsprechende Methoden zur Entscheidungsunterstützung angegeben werden. Diese erzeugen mit formalen Methoden Vorschläge, die immer als Anhaltspunkte und niemals als endgültig anzusehen sind. Neben diesem Ergebnisaspekt können Methoden der Entscheidungsunterstützung zum Prozess einer Entscheidungsfindung beitragen, und zwar durch einen gewissen Grad an Transparenz.

Als Ausgangsüberlegung dient ein einfaches sog. ganzzahliges lineares Programm. Dabei wird zunächst von zwei, nicht gegenseitig deckungsfähigen Budgets für Sanierung und Neubau ausgegangen. Ziel ist, die damit erzielbare Maximierung der Emissionsreduktionen bzw. die Minimierung der verbleibenden Emissionen zu ermitteln.

$$\begin{aligned} \min \sum_{i=1}^n a_i \cdot (e_i - r_i \cdot x_i - R_i \cdot y_i) \\ \text{so dass } \sum_{i=1}^n a_i \cdot k_i \cdot x_i \leq S \\ \sum_{i=1}^n a_i \cdot K_i \cdot y_i \leq N \\ x_i + y_i \leq 1, \quad i = 1, \dots, n \\ x_i, y_i \in \{0, 1\}, i = 1, \dots, n \end{aligned}$$

Variablen:

$x_i = 0, 1$ Gebäude i wird nicht energetisch saniert bzw. wird energetisch saniert.

$y_i = 0, 1$ Gebäude i wird in gleicher Größe nicht neu gebaut bzw. wird neu gebaut.

Koeffizienten:

a_i Größe von Gebäude i in m^2 .

e_i aktuelle, dem Gebäude i pro m^2 zuordenbare Emissionen (exkl. Nutzung).

r_i Emissionsreduktion durch Sanierung von Gebäude i pro m^2 .

R_i Emissionsreduktion durch Neubau von Gebäude i pro m^2 .

k_i Kosten der (energetischen) Sanierung von Gebäude i pro m^2 .

K_i Kosten Neubau von Gebäude i pro m^2 .

S (jährliches) Sanierungsbudget.

N (jährliches) Neubaubudget.

Die Emissionswerte e_i werden zur Optimierung nicht benötigt, dienen aber der Intuition. Die Koeffizienten erfüllen sinnvollerweise die Bedingungen $e_i > R_i > r_i > 0$ und $K_i > k_i > 0$. Der Ausgangsansatz berücksichtigt noch nicht, dass in mehreren Schritten bzw. über mehrere Jahre vorgegangen wird, dass Sanierung und Neubau zu unterschiedlichen Kosten und unterschiedlicher Reduktionsqualität vorgenommen werden können und dass Sanierung und Neubau unterschiedliche zeitliche Wirkungen besitzen.

Ein übersichtliches Beispiel mit nur $n = 4$ Gebäuden soll das Prinzip erläutern. Das ganzzahlige LP hat die Struktur

$$\max \sum_{i=1}^4 a_i \cdot r_i \cdot x_i + R_i \cdot y_i$$

$$\begin{pmatrix} a_1 \cdot k_1 & 0 & a_2 \cdot k_2 & 0 & a_3 \cdot k_3 & 0 & a_4 \cdot k_4 & 0 \\ 0 & a_1 \cdot K_1 & 0 & a_2 \cdot K_2 & 0 & a_3 \cdot K_3 & 0 & a_4 \cdot K_4 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ x_2 \\ y_2 \\ x_3 \\ y_3 \\ x_4 \\ y_4 \end{pmatrix} \leq \begin{pmatrix} S \\ N \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$x_1, y_1, x_2, y_2, x_3, y_3, x_4, y_4 \in \{0, 1\}$$

Beispielkoeffizienten.

Sanierungsbudget $S = 1\,200\,000$,

Neubaubudget $N = 17\,000\,000$

i	a_i	r_i	R_i	k_i	K_i
1	2000	12	30	160	2000
2	3000	9	28	180	1500
3	6000	7	26	120	1900
4	7000	11	31	170	2100

Die optimale Lösung ergibt sich, z. B. mit Octave (Version 3.0.3 unter Benutzung der Routine `glpk` bzw. der GNU Routine `lpsolve`, siehe [EaBaHa]), zu

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ x_2 \\ y_2 \\ x_3 \\ y_3 \\ x_4 \\ y_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Dieser formal erzeugte Vorschlag bedeutet, dass die Gebäude 2 und 3 neu gebaut werden, Gebäude 4 wird (energetisch) saniert und Gebäude 1 bleibt unverändert. Diese Maßnahmen nutzen die Budgets wie folgt aus

$$\begin{pmatrix} 7000 \cdot 170 \\ 3000 \cdot 1500 + 6000 \cdot 1900 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1\,190\,000 \\ 15\,900\,000 \end{pmatrix} \leq \begin{pmatrix} 1\,200\,000 \\ 17\,000\,000 \end{pmatrix}$$

Man beachte, dass Gebäude 1 die höchste sanierungsbedingte Emissionsreduktion pro m², das größte, also günstigste Verhältnis von Emissionsreduktion zu Kosten (r_i / k_i) bei Sanierung und das zweitgrößte Verhältnis von Emissionsreduktion zu Kosten (R_i / K_i) bei Neubau aufweist. Trotzdem wird Gebäude 1 (zunächst) nicht berücksichtigt. Dies liegt u. a. an den Flächengrößen. Die anderen Gebäude sind größer und erbringen größere Gesamtreduktionen.

Der Schlupf des Neubaubudgets, d. h. der ungenutzte Betrag des Neubaubudgets von 1 100 000 deckt hingegen den Sanierungsaufwand von 320 000 für Gebäude 1. Läge allerdings das Neubaubudget bei nur 16 000 000, könnte Gebäude 1 definitiv nicht berücksichtigt werden.

Sofern ganzzahlige Lösungen nicht direkt erzeugt werden können, werden approximative Lösungen durch Relaxierung der Ganzzahligkeitsbedingungen bestimmt. D. h. $x_i, y_i \in \{0,1\}$ wird abgeschwächt zu $0 \leq x_i \leq 1$ und $0 \leq y_i \leq 1$. Nicht ganzzahlige Werte der Variablen einer optimalen Lösung werden gerundet und die dadurch ggf. auftretenden Verletzungen von Nebenbedingungen werden beseitigt.

Viele Variationen des Ausgangs LPs und deren Kombination sind möglich. Eine Variante besteht in der Berücksichtigung von verschiedenen Sanierungsstufen, z. B. von drei Sanierungsstufen, zu unterschiedlichen Kosten und unterschiedlichen Emissionsreduktionen, jeweils gebäudeabhängig.

$$\min \sum_{i=1}^n a_i \cdot (e_i - r_i^1 \cdot x_i^1 - r_i^2 \cdot x_i^2 - r_i^3 \cdot x_i^3 - R_i \cdot y_i)$$

$$\text{so dass } \sum_{i=1}^n a_i \cdot (k_i^1 \cdot x_i^1 + k_i^2 \cdot x_i^2 + k_i^3 \cdot x_i^3) \leq S$$

$$\sum_{i=1}^n a_i \cdot K_i \cdot y_i \leq N$$

$$x_i^1 + x_i^2 + x_i^3 + y_i \leq 1, \quad i = 1, \dots, n$$

$$x_i^1, x_i^2, x_i^3, y_i \in \{0,1\}, \quad i = 1, \dots, n$$

Analog kann man verschiedene Neubaustufen (in Kombination mit verschiedenen Sanierungsstufen) analysieren. Eine weitere Variation des Ausgangs LPs berücksichtigt Zeiteffekte.

$$\min \sum_{i=1}^n a_i \cdot (r_i \cdot t_i \cdot x_i - R_i \cdot T_i \cdot y_i)$$

$$\text{so dass } \sum_{i=1}^n a_i \cdot k_i \cdot x_i \leq S$$

$$\sum_{i=1}^n a_i \cdot K_i \cdot y_i \leq N$$

$$x_i + y_i \leq 1, \quad i = 1, \dots, n$$

$$x_i, y_i \in \{0, 1\}, \quad i = 1, \dots, n$$

Weitere Koeffizienten

t_i geschätzte Restnutzungsdauer von Gebäude i nach Sanierung in Jahren.

T_i geschätzte Nutzungsdauer von Gebäude i nach Neubau in Jahren.

Auch die Art der Budgets kann variiert werden. So ist Zusammenlegung oder die Unterteilung in weitere Budgets, z. B. für ein Hochschulprogramm, möglich. Sofern Kosten- und Reduktionsgrößen nicht genau ermittelt werden können, empfiehlt sich, alternative Priorisierungen mit variierenden Größen (Schätzung, Schätzung + 10%, Schätzung -10% etc.) zu ermitteln und manuell auszuwerten, z. B. auf Übereinstimmungen.

Quellen

- [BaGr] Bachmaier, J., Gronauer, A., „Klimabilanz von Biogasstrom“, Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Freising, 2007.
- [BalHaMu] Balogh, S., Hall, Ch., Murphy, D., „What is the minimum EROI that a sustainable society must have?“, Energies 2009, www.mdpi.com/journal/energies.
- [EaBaHa] Eaton, J.W., Bateman, D., Hauberg, S., "GNU Octave Manual", Network Theory Limited, 3. Auflage, 2007, www.octave.org.
- [EnOB] Forschung für energieoptimiertes Bauen, Generalsanierung zum Bürogebäude im Passivhausstandard, Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, Berlin, 2009, www.enob.info/de/sanierung/projekt/details/generalsanierung-zumbuerogebaeude-im-passivhausstandard.
- [FCC] Future Camp Climate GmbH, „Der CO₂-Fussabdruck der Hessischen Landesverwaltung – Eröffnungsbilanz 2008“, Stand vom 3.12.2010, München, 2010.
- [Fu] Fuglestedt, J.S. et al. „Metrics of climate change: assessing radiative forcing and emission indices“, Climatic Change 58, 2003, S. 267–331.
- [FrRaSch] Fritsche, U.R., Rausch, L., Schmidt, K., „Treibhausgasemissionen und Vermeidungskosten der nuklearen, fossilen und erneuerbaren Strombereitstellung“, Öko-Institut, Darmstadt, 2007.
- [Gra] Grassmann, P.H., „Burn Out: Wie wir eine aus den Fugen geratene Wirtschaft wieder ins Lot bringen“, Oekom-Verlag, München, 2010.

- [HBM] Hessisches Baumanagement, „Auswertung der liegenschaftsbezogenen Kennwerte für Wärme und Strom des Jahres 2007 des CC EBS des hbm“, Frankfurt, 2008.
- [HMU] Hessisches Ministerium für Umwelt, ländlichen Raum und Verbraucherschutz, „Klimaneutralität“, Handbuch für Klimaneutralität, Klimapartner, S. 13, Hrsg. First Climate GmbH, Berlin, 2007/08.
- [HRT] Hayner, M., Ruoff, J., Thiel, D., „Faustformel Gebäudetechnik für Architekten“, Deutsche Verlagsanstalt, München, 2010.
- [IEA] „Gadgets and Gigawatts - Policies for Energy Efficient Electronics“, Internationale Energie Agentur, Paris, 2009.
- [NBBW1] Nachhaltigkeitsbeirat Baden-Württemberg (NBBW): Nachhaltigkeits-Doppelstrategie: Wirksame Beiträge Baden-Württembergs zur weltweiten nachhaltigen Entwicklung. Sondergutachten, Stuttgart, 2010.
- [NBBW2] Nachhaltigkeitsbeirat der Landesregierung Baden-Württemberg (NBBW): Weiterentwicklung der baden-württembergischen Klimadoppelstrategie: Was kann die Landesregierung tun, um das Plus2°C-Klimaziel global zu erreichen? Sondergutachten, Stuttgart 2010.
- [PeLe] Peter, S., Lehmann, H., „Renewable Energy Outlook 2030 - Energy Watch Group Global Renewable Energy Scenarios“, World Council for Renewable Energy, Bonn bzw. Energy Watch Group / Ludwig-Boelkow-Stiftung, 2008.
- [PK] PrimaKlima-weltweit-e.V., „Das Klimaschutzpotential der Wald-Holz-Option ist groß“, www.prima-klima-weltweit.de, 2007.

- [PI] Plöderl, H. et al., „Erste Passivhaus-Schulsanierung“, Berichte aus Energie und Umweltforschung, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien, 2008, www.hausderzukunft.at/kontakt.htm.
- [Ra] Radermacher, F. J.: Der Weg zu einem wirkungsvollen globalen Klimaregime - die Potentiale von Kopenhagen nutzen, FAW/n-Bericht, Entwurf, April 2010.
- [Sci] Computeralgebrasystem "Scilab" unter Grafiksystem X11 und MAC OS 10.6, www.scilab.org.
- [SD] Schulze Darup, B. u. a., „Energieeffizienz mit städtebaulicher Breitenwirkung“, GdW, Berlin, 2009.
- [Sel] Selivanova, Y., „The WTO and Energy. WTO Rules and Agreements of Relevance to the Energy Sector“, Issue Paper No. 1, International Center for Trade and Sustainable Development, 2007.
- [UBA] „Carbon Leakage: Die Verlagerung von Produktion und Emissionen als Herausforderung für den Emissionshandel?“, Umweltbundesamt, Deutsche Emissionshandelsstelle (DEHSt), Dessau, 2008, www.umweltbundesamt.de/emissionshandel.
- [VDMA] „Strommix in der EU 27 – Entwicklung der Stromerzeugung von 2007 bis 2030“, VDMA Power Systems, Frankfurt, Stand 2010, www.vdma.org/powersystems.
- [We] Weber, L, „Bestimmungsgrößen des Stromverbrauchs in Bürogebäuden“, Bulletin SEV/VSE, 2001.
- [WBGU] „Der WBGU Budgetansatz“, factsheet 3, Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen, Berlin, 2009.

Einzelne Weblinks (Auswahl)

www.bundesregierung.de/Webs/Breg/DE/Energiekonzept/energiekonzept.html

www.cdmgoldstandard.org

www.hessen-nachhaltig.de/web/co2-neutrale-landesverwaltung

www.iaf-ingenieure.de

www.passiv.de

Autoren

Thomas Kämpke ist als leitender Wissenschaftler am FAW/n zuständig für Datenanalyse und Modellierung. Hauptautor und Ansprechpartner dieser Studie. Kontakt: kaempke@faw-neu-ulm.de

Franz Josef Radermacher ist von der Ausbildung her Mathematiker und Ökonom, Professor für Informatik an der Universität Ulm, zugleich Leiter des Forschungsinstituts für anwendungsorientierte Wissensverarbeitung/n (FAW/n), Präsident des Senats der Wirtschaft e. V., Bonn, Vizepräsident des Ökosozialen Forum Europa, Wien sowie Mitglied des Club of Rome. Des Weiteren ist Prof. Radermacher unter anderem Mitglied des Nachhaltigkeitsbeirats Baden-Württemberg, der Nachhaltigkeitskommission Hessen und Mitglied des Wissenschaftlichen Beirats Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung.

Michael Gerth ist als Wirtschaftsmathematiker am FAW/n zuständig für Projektbearbeitung, Recherchen und multimediale Informationsaufbereitung.

Dirk Solte, Promovierter Wirtschaftsingenieur, Uni Karlsruhe (TH), Stellvertreter des Vorstands am Forschungsinstitut für anwendungsorientierte Wissensverarbeitung/n, Ulm, Privatdozent an der Universität St. Gallen (HSG), Habilitation in Betriebswirtschaftslehre.