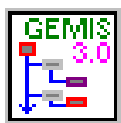


Gesamt-Emissions-Modell integrierter Systeme



(GEMIS) Version 3.08



Xmas Edition

**Ein Computer-Instrument zur Umwelt- und Kostenanalyse von
Energie-, Transport- und Stoffsystemen**

- i.A. des Hessischen Ministers für Umwelt, Energie, Jugend, Familie und Gesundheit



erstellt von

**Uwe R. Fritsche/Matthias Buchert/Christian Hochfeld/Wolfgang Jenseit/Felix C.
Matthes/Lothar Rausch/Hartmut Stahl/Johannes Witt**



Büro Darmstadt

Bunsenstr. 14
64293 Darmstadt
Tel. 06151-8191-0
FAX 06151-8191-33

Geschäftsstelle Freiburg

Binzengrün 34 A
79114 Freiburg
Tel. 0761-45295-0
FAX 0761-475437

Büro Berlin

Friedrichstr. 165
10117 Berlin
Tel. 030-2016-5080
FAX 030-2016-5088

Darmstadt/Freiburg/Berlin, Weihnachten 1998

Inhalt

Vorwort	iii
Danksagung	iv
Zusammenfassung: Was ist GEMIS ?	Z-1
Was ist neu in GEMIS 3.0 ?	Z-2
Was ist neu in GEMIS 3.08 (Xmas Edition) ?	Z-4
Wie geht es weiter mit GEMIS ?	Z-5
Wo erfahre ich mehr zu GEMIS ?	Z-6
1. Zum Hintergrund von GEMIS	1
2. Das Computermodell GEMIS	4
2.1 Neu in GEMIS: Emissionsminderungstechniken	7
2.2 Neu in GEMIS: „Fremde“ Daten	7
2.3 Neu in GEMIS: Eigene Schadstofflisten	8
2.4 „Was hinten herauskommt“: Ergebnisse von GEMIS	8
3. Anwendungen von GEMIS	10
3.1 Anwendung für Energie- und Klimaschutzkonzepte	10
3.2 Szenariengestützte Bewertung	11
3.3 Anwendung in der Energie- und Umweltberatung	11
3.4 AnwenderInnen von GEMIS	11
3.5 Exkurs: Der VdEW-Datensatz für GEMIS 3.0	14
4. Ausgewählte Ergebnisse von GEMIS	16
4.1 Die Bedeutung der vorgelagerten Prozesse	16
4.2 Vergleiche von Systemen zur Strombereitstellung	20
4.3 Vergleiche von Systemen zur Wärmebereitstellung	28
4.4 Vergleiche von Systemen mit Kraft-Wärme-Kopplung	34
4.5 Vergleiche von Transportsystemen	36
5. Nach GEMIS 3.0: Perspektiven...	40
6. Schlußbemerkung: Grenzen der EDV	41
7. Relevante Literatur zu GEMIS	42
Angang: Daten zu Vorketten in Tabellen	A-1
A-1 Vorgelagerte Emissionen bei der Bereitstellung von Braunkohle	A-2
A-2 Vorgelagerte Emissionen bei Öl- und Gasprodukten	A-4
A-3 Emissionen bei der Bereitstellung von Strom	A-6
A-4 Vorgelagerte Emissionen bei regenerativen Energien	A-8
A-5 Emissionen bei der Bereitstellung von Stoffen	A-10

Vorwort

Bereits die rot-grüne Landesregierung hatte 1987 das Öko-Institut e.V. beauftragt, das Instrumentarium für eine Umweltwirkungsanalyse von Energiesystemen zu entwickeln.

Das daraus entwickelte GEMIS-Modell (Gesamt-Emissions-Modell Integrierter Systeme) ermöglicht es, Primärenergiebedarf und Schadstoffemission verschiedener Energiesysteme zu vergleichen sowie auf jeder Stufe der Energiegewinnung, -umwandlung und -nutzung nachzuvollziehen. In der Folge wurde das Modell um den Verkehrsbereich erweitert, Stoffströme mit aufgenommen und ostdeutsche Anlagen einbezogen.

GEMIS hat breite wissenschaftliche und politische Anerkennung nicht nur in Deutschland, sondern auch auf internationaler Ebene gefunden. GEMIS als ein relativ universales Instrument findet inzwischen Anwendung sowohl in der Energiewirtschaft, auf der kommunalen Ebene als auch im wissenschaftlichen Bereich.

Mit der aktuellen Version 3.0 wurde GEMIS wiederum um weitere Daten insbesondere im Verkehrsbereich und bei den Stoffströmen ergänzt.

Außerdem wurde die Verbindung zum IKARUS-Projekt des Bundesforschungsministeriums hergestellt. Die Nutzer und Nutzerinnen können also auf die wichtigsten Datensätze auch dieses Projektes zugreifen.

GEMIS wurde mit dieser Version auf WINDOWS[®] umgestellt. Durch die Einbindung des „Environmental Manual for Power Development“, das vom Öko-Institut im Auftrag der Deutschen Gesellschaft für technische Zusammenarbeit (GTZ) und der Weltbank entwickelt wurde, konnten dessen fortgeschrittene Hilfssysteme und Möglichkeiten der Datendokumentation in GEMIS übertragen werden.

Dadurch wird auf einen **eigenen Bericht verzichtet**, da alle relevanten Informationen im Programm selbst enthalten sind. Der veröffentlichte Kurzbericht beschränkt sich darauf, interessante Ergebnisse aus der Anwendung von GEMIS 3.0 wiederzugeben.

GEMIS soll dazu beitragen, die Umweltwirkungsanalyse zum selbstverständlichen Bestandteil von Entscheidungsprozessen in energiewirtschaftlichen und kommunalen Planungen zu etablieren. GEMIS bietet dazu nicht nur ein handliches und übersichtliches Werkzeug, sondern hilft vor allem, die Diskussion zu versachlichen.

Dieses Anliegen steht für die Landesregierung im Vordergrund. Deshalb wird GEMIS 3.0 für alle interessierten Nutzer und Nutzerinnen ab jetzt auch im Internet zugänglich sein.

Die Landesregierung hofft, den Kreis der NutzerInnen noch wesentlich erweitern zu können.

Wir danken den Bearbeitern des Öko-Instituts, insbesondere Herrn Uwe Fritsche und Herrn Lothar Rausch, für ihre qualifizierte und engagierte Arbeit.

Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Jugend, Familie und Gesundheit

Priska Hinz

Danksagung

Das Forschungsprojekt GEMIS wird vom HMUEJFG und anderen Institutionen gefördert und durch Anregungen, Daten und Kritik verschiedener Einrichtungen und Personen im In- und Ausland aktiv unterstützt, wofür an dieser Stelle herzlich gedankt sei¹.

Die Umstellung von GEMIS auf Betrieb unter WINDOWS[®] wurde durch Software erleichtert, die vom Öko-Institut für *die Deutsche Gesellschaft für technische Zusammenarbeit (GTZ)* entwickelt wurde. Für die Nutzung des Codes sei ebenfalls gedankt, insbesondere Herrn Tilman C. Herberg.

Die Übernahme der Verkehrsdaten des Umweltbundesamtes in GEMIS 3.0 wurde durch die freundliche Unterstützung von Werner Niederle möglich.

Unser spezieller Dank gilt Frau Gabriele Purper (HMUEJFG Abt. UE VI) sowie der hessenENERGIE GmbH.

Die Verantwortung für die Ergebnisse liegt jedoch allein bei den Verfassern.

Darmstadt/Freiburg/Berlin, Dezember 1998

Die Autoren

¹ Wir stehen für Mitarbeit, Diskussionsbereitschaft und kritische Begleitung des Projekts in der Schuld unserer KollegInnen im Öko-Institut und danken insbesondere auch Patrick Hofstetter und Rolf Frischknecht (ETH Zürich).

Zusammenfassung: Was ist GEMIS ?

Das Computermodell GEMIS (**G**esamt-**E**missions-**M**odell **i**ntegrierter **S**ysteme) wurde als Instrument zur vergleichenden Untersuchung von Umwelteffekten der Energiebereitstellung und -nutzung von Öko-Institut e.V. und Gesamthochschule Kassel (GhK) in den Jahren 1987-1989 entwickelt und seitdem kontinuierlich fortentwickelt und aktualisiert. GEMIS umfaßt Grunddaten zu

- **Bereitstellung von Energieträgern** (Prozeßketten- und Brennstoffdaten) - neben fossilen Energieträgern (Stein- und Braunkohle, Erdöl, Erdgas), regenerativen Energien, Hausmüll und Uran auch sog. Nachwachsende Rohstoffe (schnellwachsende Hölzer, Chinagrass, Raps, Zuckerhirse) sowie Wasserstoff
- Technologien zur Bereitstellung von **Wärme- und Strom** (Heizungen, Warmwasser, Kraftwerke aller Größen und Brennstoffe, Heizkraftwerke, BHKW...)
- **Stoffbereitstellung** (vor allem Grundstoffe und Baumaterialien) inklusive deren vorgelagerter Prozesse (bei Importen auch im Ausland)
- **Transportprozessen**, d.h. Personenkraftwagen (für Benzin, Diesel, Strom, Biokraftstoffe), Öffentliche Verkehrsmittel (Bus, Bahn) und Flugzeuge sowie Prozesse zum Gütertransport (Lastkraftwagen, Bahn, Schiffe und Pipelines).

GEMIS berücksichtigt von der Primärenergie- bzw. Rohstoffgewinnung bis zur Nutzenergie- bzw. Stoffbereitstellung alle Schritte und bezieht Hilfsenergie- und Materialaufwand zur Herstellung von Energieanlagen und Transportsystemen ein.

Die Datenbasis enthält für alle diese Prozesse

- Kenndaten zu Nutzungsgrad, Leistung, Auslastung, Lebensdauer,
- direkte Luftschadstoffemissionen (SO₂, NO_x, Halogene, Staub, CO, NMVOC)
- Treibhausgasemissionen (CO₂, CH₄, N₂O sowie alle FCKW/FKW)
- feste Reststoffe (Asche, Entschwefelungsprodukte, Klärschlamm, Produktionsabfall, Abraum)
- flüssige Reststoffe (AOX, BSB5, CSB, N, P, anorganische Salze)
- sowie den Flächenbedarf.

GEMIS kann zudem *Kosten* analysieren - die entsprechenden Kenndaten der Brenn- und Treibstoffe sowie der Energie- und Transportprozesse (Investitions- und Betriebskosten) sind in der Datenbasis ebenfalls enthalten.

Mit GEMIS können die Ergebnisse von Umwelt- und Kostenanalysen auch *bewertet* werden: durch die Aggregation von klimarelevanten Schadstoffen zu CO₂-Äquivalenten und die Ermittlung *externer* Umweltkosten, die zusammen mit den betriebswirtschaftlichen („internen“) Kosten zur Bestimmung der volkswirtschaftlichen Gesamtkosten dienen können.

Was ist neu in GEMIS 3.0 ?

Seit der Version 3.0 ist GEMIS als Anwendung unter WINDOWS[®] (Version 3.11 oder höher) bzw. WINDOWS-NT[®] (Version 4.0 oder höher) auf IBM-kompatiblen Personal Computern lauffähig², als Programmierumgebung wurde DELPHI[®] 2.0-4.0 verwendet³.

Durch den Betrieb unter WINDOWS[®] wurden möglich:

- Mehrfachfenster, die sich gegenseitig aktualisieren (z.B. Brennstoffdefinition und Emissionen von Kraftwerken),
- Mausnutzung (inkl. rechter Maustaste), lokale Menüs in den Fenstern
- Kopieren von GEMIS-Daten in andere WINDOWS[®]-Anwendungen (über Zwischenablage)
- kontextsensitive Online-Hilfe, Online-Glossar und Stichwortsuche in der Hilfe, Online-Modelldokumentation (alle Algorithmen)
- Ein neuer Szenariotyp, in dem bei Energiesystemen sowohl Leistung (z.B. in MW) wie auch Arbeit (z.B. in MWh) jeweils für Strom und Wärme berücksichtigt werden können und die Behandlung von Koppelprodukten bei der Kraft-Wärme-Kopplung in transparenter Weise in der Szenariodefinition möglich ist
- Automatisches Skalieren von Prozeßdaten beim Kopieren - NutzerInnen können nun eigene Daten leicht durch Kopieren der geschützten Stammdaten erzeugen und an die gewünschte Leistung anpassen
- Mehrfachfilter zur gezielten Suche in der Datenbank, Nutzung von graphischen Symbolen zum schnellen Erkennen der Datentypen
- Datendokumentation direkt bei den Produkten und Prozessen, Angaben zur Datenherkunft (Referenzen) mit integrierter Referenz-Datenbank, Angaben zur Datenqualität

Die in **GEMIS 3.08** erfolgten Aktualisierungen und Ergänzungen der **Datenbasis** beruhen auf Arbeiten des Öko-Instituts aus Studien von 1997-98 für das Umweltbundesamt. Außerdem wurden einige Fehler im Stammdatensatz korrigiert und der Datensatz der VdEW integriert.

² Es sind mindestens ein Prozessor des Typs 486, 8 MB Arbeitsspeicher (RAM) sowie 10 MB freie Festplattenkapazität erforderlich.

³ Die Entwicklung von GEMIS 3.0 sowie der zugehörigen Datenbasis erfolgte nach bestem Wissen und Gewissen der Autoren. Es wird jedoch weder für die Richtigkeit von GEMIS 3.0 noch für die Anwendbarkeit des Modells oder seiner Teile eine Gewährleistung übernommen. Ebenso sind alle Haftungsansprüche aus Anwendung, Nutzung bzw. sonstiger Bezug- oder Inanspruchnahme von GEMIS 3.0 und seiner Teile ausgeschlossen. Die Nennung von Firmen- und Warenzeichen sowie Produktnamen im vorliegenden Bericht sowie in GEMIS 3.0 und seinen Teilen erfolgt, ohne eine Empfehlung, Bewertung oder sonstige Beziehung zwischen den Autoren und den Firmen- und Warenzeichen bzw. Produktnamen herzustellen. Insbesondere stellt eine erfolgte Nennung keine Bevorzugung gegenüber anderen, gleich oder ähnlich leistungsfähigen Firmen und Produkten dar, sondern dient allein der Information über Hard- und Software, die für die Durchführung des Forschungsprojekts verwendet wurde oder im Zusammenhang mit der Nutzung des Modells steht. Ansprüche Dritter aus Nennung bzw. Nichtnennung von Firmen- und Warenzeichen sowie Produktnamen im vorliegenden Bericht sowie in GEMIS 3.0 und seinen Teilen sind ausgeschlossen.

Neu sind im Einzelnen:

- Alle Verbrennungsprozesse (thermische Kraftwerke, Kessel, Heizungen) können mit eigenständigen **Emissionsminderungsmodulen** verknüpft werden, die GEMIS-Datenbank enthält eine Vielzahl solcher Technologien für verschiedene Brennstoffe und Leistungsklassen (z.B. Entstaubungs-, Entschwefelungs- und Entstickungsverfahren).
- Alle Prozesse sind mit einem **Ortsbezug** versehen - damit kann GEMIS genau ermitteln, wo Emissionen anfallen. Der Ortsbezug umfaßt die einzelnen EU-Staaten, die GUS, Staaten in Afrika sowie Australien und die USA. Daneben wurden Regionen (OPEC, Tropen) definiert.
- Alle Datensätze haben eine **Datenquelle** - neben den vom Öko-Institut definierten finden Sie in GEMIS 3.0 nun auch **Daten von Dritten** - z.B. aus dem IKARUS-Projekt, dem Umweltbundesamt (UBA) zu Pkw und Lkw sowie der GH Kassel zu Landwirtschaft und Ernährung und der eigene Datensatz der **VdEW** (*siehe dazu Exkurs im Abschnitt 3.4*)
- Die **Stoffprozesse** wurden drastisch erweitert, komplett überarbeitet und aktualisiert. Neben Grund- und Baustoffen sind auch regionsspezifische Importe (z.B. Aluminium) mit erfaßt. Als wichtige Neuerung in GEMIS 3.08 wurden die Prozeßketten für die Edelmetalle Platin sowie Rhodium aufgenommen.
- Die Kostendaten für Energiesysteme wurden aktualisiert
- Alle Kostendaten sind auf DM-1996 umgerechnet
- Bei der Bewertungshilfe zur **Klimarelevanz** wurden die neuesten Daten des IPCC (von 1996) zu den CO₂-Äquivalenzfaktoren (inkl. FCKW und FKW) berücksichtigt

Schließlich ist eine ganz wichtige Neuerung, daß GEMIS 3.0 **kostenlos genutzt** werden kann - dank der Entscheidung des Hessischen Ministeriums für Umwelt, Energie, Jugend, Familie und Gesundheit (HMUEJFG).

Sie können GEMIS 3.08 auch selbst weitergeben oder Dritte darauf hinweisen.

Änderten sich bisherige GEMIS-Ergebnisse ?

Durch die Aktualisierung sind vor allem Stoff- und Verkehrsdaten betroffen, die neuen Daten aus GEMIS 3.0 sind besser abgesichert als die in GEMIS 2.1.

Bei den Energieprozessen wurden die Kosten aktualisiert und „fremde“ Daten (z.B. IKARUS-Projekt des BMBF) berücksichtigt. Generell sind hier die Ergebnisse mit denen aus GEMIS 2.1 vergleichbar.

Was ist neu in GEMIS 3.08 (Xmas Edition) ?

Die vorliegende Datenaktualisierung umfaßt einige Korrekturen des Modells und seines Datenbestands⁴ sowie Ergänzungen im Bereich der Stoff- und Energiesysteme, wobei hierzu Ergebnisse aus Forschungsvorhaben für das Umweltbundesamt dienen (vgl. Öko 1997-1999):

- Einbeziehung der kompletten Prozeßketten für **Platin und Rhodium** mit differenzierten ausländischen Produktionsdaten⁵
- Ergänzung der **Baustoffe und Baumaterialien** sowie dazu notwendiger Hilfsstoffe mit entsprechenden Vorketten⁶
- Ergänzung der Daten zu Landwirtschaft und Ernährung (L&E), wozu die Gesamthochschule/Universität Kassel (Wissenschaftliches Zentrum für Umweltsystemanalyse) eine eigene Datendokumentation erstellt hat, die als PDF-Datei auf der GEMIS-CDROM enthalten ist und auch von den Internet-Seiten zu GEMIS bezogen werden kann

Außerdem wurde der GEMIS-Datensatz der VdEW integriert (vgl. *dazu den Exkurs im Abschnitt 3.5*), eine Datendokumentation hierzu gibt es als HLP-Datei auf den Internet-Seiten zu GEMIS.

Weiterhin wurden 1997 und 1998 eigene Länderdatensätze für Luxemburg, Österreich und Tschechien verfügbar, die entsprechenden Bezugsmöglichkeiten werden auf den GEMIS-Seiten im Internet (siehe unten) veröffentlicht.

Parallel zu GEMIS und TEMIS ist seit 1995 das sog. „ENVIRONMENTAL MANUAL FOR POWER DEVELOPMENT“ (kurz: EM) verfügbar, das in englischer Sprache die wichtigsten GEMIS-Optionen auch für **Entwicklungsländer** bietet, jedoch nur für Energiesysteme, nicht für Verkehrs- und Stoffsysteme⁷.

Für das EM gibt es eigene Datensätze für verschiedene Länder (darunter China, Indien, Marokko, Polen, Südafrika), die kontinuierlich ausgeweitet werden.

Im Frühjahr 1999 werden die wichtigsten Informationen aus diesen Ländern auch für GEMIS verfügbar sein.

Soweit sich bis Sommer 1998 Korrekturen des Programm als notwendig erweisen, werden auch diese auf den GEMIS-Seiten im Internet (siehe nächste Seite) kostenlos bereitgestellt.

⁴ Die wichtigsten Korrekturen sind: Schwefelgehalt von leichtem Heizöl auf 0,17 % korrigiert (Fehler durch Kopieren von Diesel); Definition der bivalenten elektrischen Wärmepumpen beseitigt; Kosten der Naß-REA in Ostdeutschland berichtigt (Fehler bei Umrechnung von elektrisch auf thermische Leistung); Dateneingabefehler bei der Magnesiumherstellung (Einheiten der Hilfsenergie falsch) korrigiert. Weiterhin wurde die Biogasanlagen durch adäquatere Definition des Wassergehalts der Gülle realistischer gestaltet. Wir bitten alle AnwenderInnen um Verständnis.

⁵ Zur Darstellung des Datenhintergrunds hierfür sei auf die im GEMIS-Datensatz enthaltenen Referenzen bei diesen Prozessen verwiesen sowie auf die Darstellung in ÖKO 1997b.

⁶ Diese Daten stammen aus dem UBA-F&E-Vorhaben „Stoffflußbezogene Bausteine...“, das vom Öko-Institut in den Jahren 1997-98 bearbeitet wurde (vgl. ÖKO 1997a + 1998).

⁷ Das EM hat eigene Seiten im Internet - <http://www.oeko.de/service/em>

Wie geht es weiter mit GEMIS ?

Die Zukunft hat begonnen - mit einem im Oktober 1998 gestarteten Projekt wird GEMIS fortentwickelt und aktualisiert. In dieser "GEMIS 3.x" genannten Version steht "x" für eXtended und für Xmas - wie schon bei der Version 3.0 wird der Verarbeitungs- und Datenumfang von GEMIS erweitert (Extension) und es wird jeweils ein Weihnachts-update in 1998 und 1999 vorgelegt (Xmas Edition).

Neue Modell-Features

GEMIS 3.x wird als 32-bit-Applikation nur noch unter den Betriebssystemen Windows95® bzw. Windows98® sowie Windows-NT® 4.0, laufen - mit entsprechenden Hardware-Voraussetzungen⁸. Dies erlaubt neue Modell-Optionen:

- Dynamische Kopplung von GEMIS-Szenarien an EXCEL®-Tabellen
- Export der GEMIS-Datenbasis über ACCESS®
- Verbesserte Nutzerschnittstelle durch neue Fenster-Gestaltung und erweiterte Online-Hilfe
- Neue Berechnungseigenschaften (z.B. Kumulierter Energieaufwand - KEA)

Erweiterte Datenbasis

Die in GEMIS 3.x erfolgten Aktualisierungen und Ergänzungen der Datenbasis beruhen auf Arbeiten des Öko-Instituts, die derzeit noch laufen. Es wird gehen um:

- Verkehrssysteme: Aufnahmen von Erdgas-Fahrzeugen, Update der Verkehrsprozesse aus der UBA-Datenbank
- Landwirtschaft und Ernährung
- Neue Technologien: Brennstoffzelle, Stirling-Motor
- Länderdatensätze: Italien, Luxemburg, Österreich...

Hilfe bei Anwendungen

Zu GEMIS 3.x wird es mehrere kleine „Touren“ geben, die AnwenderInnen gezielt durch das Programm führen, um bestimmte Aufgaben anhand von realen Beispielen zu erledigen. Diese neue Hilfe ergänzt die vorhandene Online-Hilfe und wird als HLP-, PDF- und HTML-Dateien angeboten werden.

Näheres erfahren Sie im Internet unter <http://www.oeko.de/service/gemis/gemis3x.htm>

⁸ GEMIS 3.x läuft auf allen IBM®-kompatiblen Personal Computern (PC), jedoch als 32-bit-Anwendung nur noch unter den Betriebssystemen Windows 95®, Windows 98® sowie Windows NT® 4.0 oder höher. GEMIS 3.x benötigt mindestens 5 MB freien Speicherplatz auf der Festplatte sowie - je nach Betriebssystem - mindestens einen Intel-486-Prozessor (oder vergleichbare Produkte) mit 8 MB RAM. Empfohlen wird ein Pentium®-Prozessor mit 32 MB RAM

Wo erfahre ich mehr zu GEMIS ?

Für GEMIS gibt es eine eigene Seiten im Internet unter

<http://www.oeko.de/service/gemis>

Dort erfahren Sie die wichtigsten Neuerungen, Hinweise auf Anwendungen usw.

Anstelle eines **Endberichts** zu GEMIS 3.0 ist die Beschreibung des Datenkerns im Programm schon enthalten, ebenso eine Nutzerhilfe und Modelldokumentation und ein Glossar.

Anstelle eines Handbuchs werden im Internet die wichtigsten Fragen zu Anwendungen und unsere Antworten veröffentlicht.

Bitte teilen Sie uns mit, wenn Sie GEMIS 3.0 nutzen - am besten per FAX oder email (siehe unten) - dann informieren wir Sie über Programm- und Daten-updates.

Ansprechpartner zu GEMIS sind

Öko-Institut (Institut für angewandte Ökologie e.V.):

Büro Darmstadt, Bunsenstr. 14, D-64293 Darmstadt

Tel. 06151-8191-0, FAX 06151-8191-33

- Uwe R. Fritsche (Energie- und Verkehrsdaten) email fritsche@oeko.de
- Lothar Rausch (Modellfragen, Stromnetze) email rausch@oeko.de
- Matthias Buchert/Wolfgang Jenseit/Christian Hochfeld/Helmut Stahl (Stoffdaten), email buchert@oeko.de bzw. jenseit@oeko.de bzw. hochfeld@oeko.de bzw. stahl@oeko.de

Hessischen Ministerium für Umwelt, Energie, Jugend, Familie und Gesundheit (HMUEJFG):

Mainzer Str. 80, 65189 Wiesbaden

Tel. 0611-815-0, FAX 0611-815-1666

- Gabriele Purper, Abt. UE VI (Energie)

Weitere Ansprech- und Kooperationspartner zur laufenden Weiterentwicklung finden Sie auf den Internet-Seiten zu GEMIS.

1. Zum Hintergrund von GEMIS

Die Verknüpfung von **Energie und Umwelt** wird nunmehr seit über zwei Jahrzehnten in der umweltwissenschaftlichen Forschung und der Umweltdiskussion aufgegriffen und ist bis heute ein aktuelles Thema.

Dabei zeigt die einfache Grundfrage "Welche Umwelteffekte werden durch welche Energiesysteme bewirkt?" eine große Komplexität, wenn die Vielfalt der Energietechniken und die Verschiedenartigkeit der jeweiligen Umwelteffekte mit bedacht werden

Studien aus den frühen 70er Jahren untersuchten überwiegend Luftschadstoffemissionen verschiedener Energieträger für die Strombereitstellung. In den frühen 80er Jahren standen über nuklearspezifische Umwelteffekte hinaus vor allem SO_2 und NO_x im Mittelpunkt des Interesses, wobei neben Kraftwerken zunehmend auch Heizsysteme für die Raumwärmebereitstellung untersucht wurden.

Seit Ende der 80er Jahre wird verstärktes Augenmerk auf die Klimawirkungen von Energiesystemen - hier vor allem die Freisetzung von Treibhausgasen - gerichtet und auch der Verkehr mit einbezogen.

Die 90er Jahre sind geprägt von einer weiteren Ausweitung der Diskussion - wurden bislang vorwiegend die direkten Umwelteffekte von Energiesystemen unter Einbeziehung der "vorgelagerten" Prozesse für Gewinnung, Transport und Umwandlung betrachtet, werden nunmehr unter dem Begriff **Ökobilanz** auch die Stoffe zur Herstellung der Energiesysteme mit berücksichtigt.

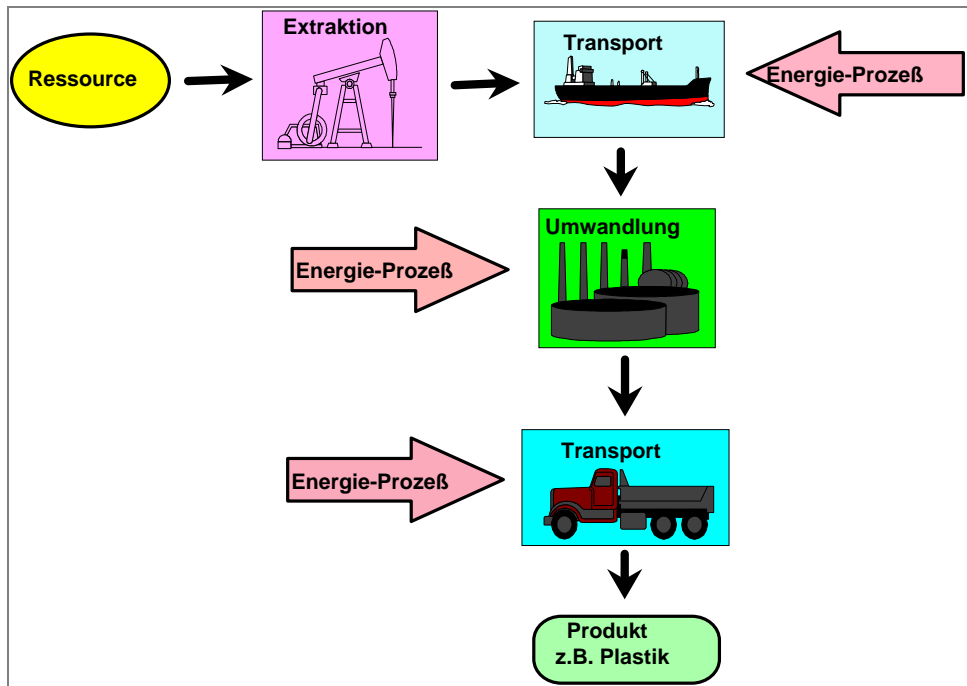
Diese **integrierte** Sichtweise für Energie- und Stoffflüsse stellt große Anforderungen an Datenbasis und Modellierung, und hebt tendenziell die Trennung zwischen energiebezogenen Umweltanalysen und solchen in anderen Bereichen (z.B. Konsumgüter, Verkehr) auf.

Ökobilanzen sollten alle relevanten physikalisch-chemischen Aktivitäten einbeziehen, die mit der Bereitstellung von Energiedienstleistungen verbunden sind, und alle relevanten Transportschritte sowie die Materialherstellung berücksichtigen.

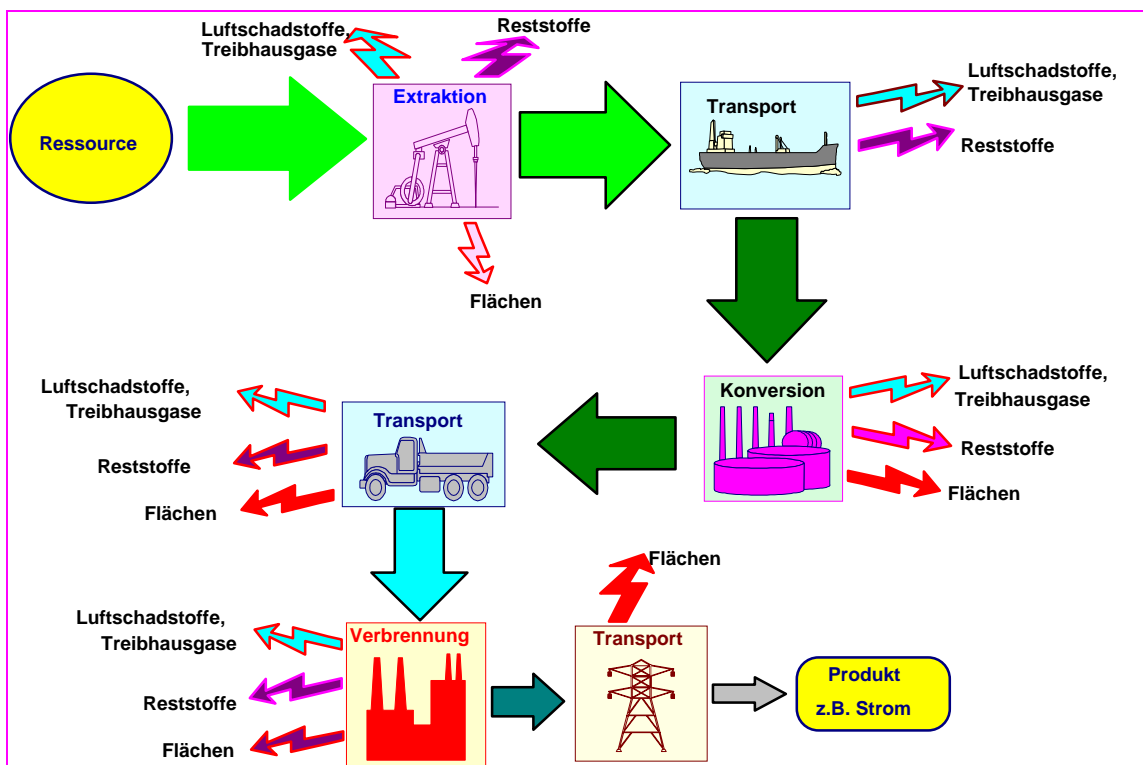
Die direkten Umwelteffekte bei der Bereitstellung eines Energieträgers ergeben sich aus allen Prozessen - von der Gewinnung von Primärenergien bis zur Nutzenergie, wobei alle Umwandlungs- und Transportvorgänge mit betrachtet werden, die zur Bereitstellung des Energieträgers notwendig sind.

Dabei muß beachtet werden, daß auch Hilfsenergien und die sie bereitstellenden Prozesse Umwelteffekte bewirken - als indirekte Wirkungen, die sich z.T. erst über Schleifen und mehrere andere Energieträger-Prozeßketten ergeben und somit nicht einfach linear berechnet werden können.

In Ökobilanzen müssen auch die **Stoffvorleistungen** (z.B. für die Herstellung von Energie- und Transportprozessen) mit einbezogen werden, was die Daten- und Modellfragen ausweitet: Neben **Energieflüssen** werden nun auch **Stoffflüsse** betrachtet sowie die **Kopplungen** zwischen beiden (siehe folgende Abbildung).

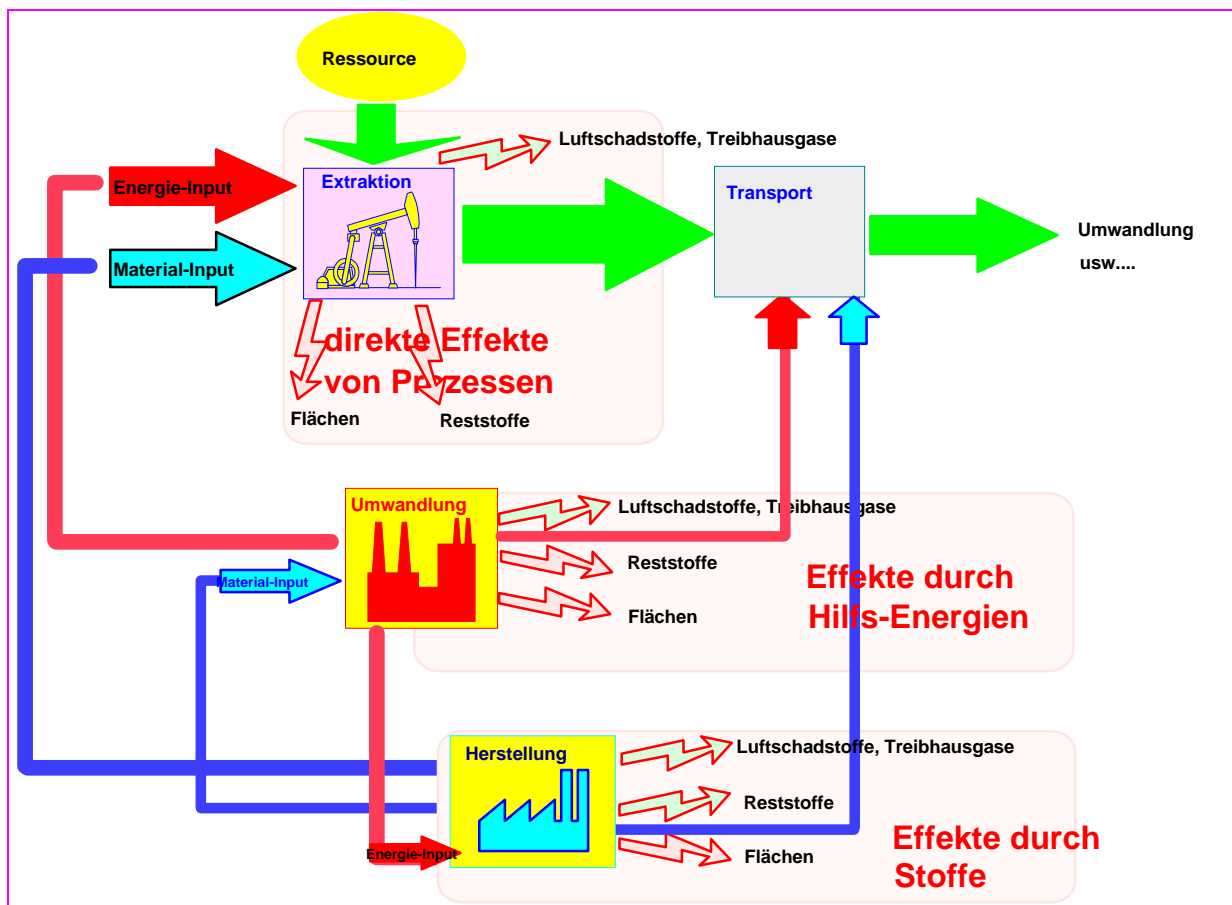


Auf **jeder** Stufe der Prozeßkette können Umwelteffekte entstehen - bei der Energie- wie auch der Stoffbereitstellung und Transporten (siehe folgendes Bild).



Die Kompliziertheit der - z.T. verschachtelten - Prozeßketten ist hoch, typischerweise treten bei **jedem** Prozeß Verknüpfungen zu Energie- und Stoffanbietern auf.

Die Umweltbilanz muß diese komplexen Verknüpfungen verfolgen, um ein möglichst vollständiges Bild der Gesamtbelastung zu vermitteln (siehe folgende Abbildung).



Diese Komplexität wird nochmals erhöht durch

- die Vielfalt unterschiedlicher Techniken, die auf jeder Prozeßstufe auftreten können (z.B. verschiedene Kraftwerkstypen, Antriebssysteme, industrielle Prozesse), sowie
- die regionalen Unterschiede (z.B. Erdgas- und Aluminiumimporte aus verschiedenen Ländern).

Hieraus ergibt sich die Notwendigkeit, für Energie-, Stoffstrom- und Umweltanalysen sowie Ökobilanzen **computergestützte Hilfsmittel** einzusetzen, die sowohl die große Datenmenge verwalten als auch die z.T. komplizierten Berechnungen durchführen können.

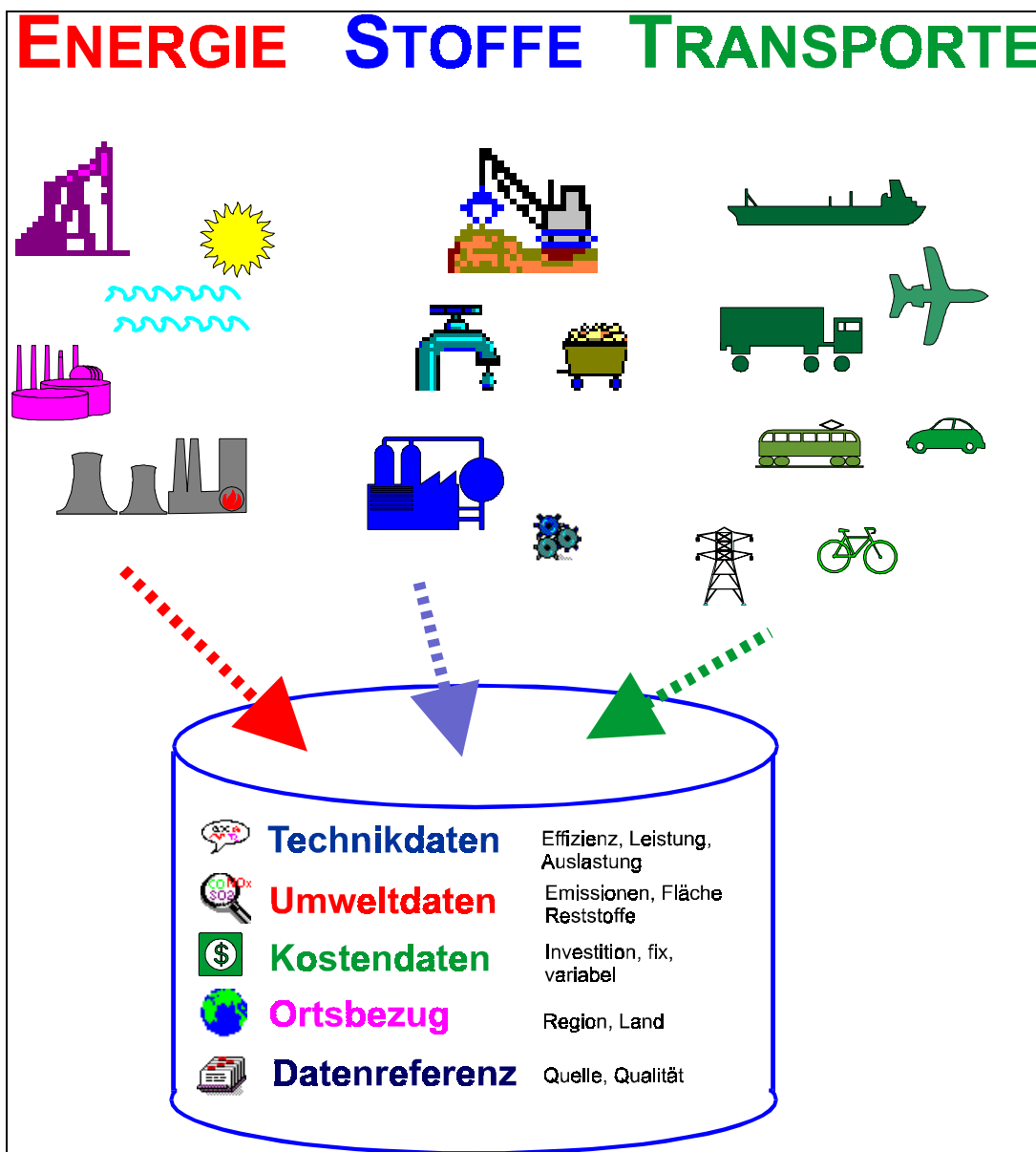
2. Das Computermodell GEMIS

Das vom Öko-Institut in Kooperation mit der Forschungsgruppe Umweltsystemanalyse der Gesamthochschule Kassel entwickelte Computermodell GEMIS (kurz für **G**esamt-**E**missions-**M**odell **i**ntegrierter **S**ysteme) ist ein spezielles Werkzeug für Umweltanalysen.

Es wurde von 1987-1989 in der Version 1.0 entwickelt und seitdem kontinuierlich weiterentwickelt - und seit der aktuellen Version 3.0 ist es **kostenlos** erhältlich.

GEMIS bildet die komplexen Prozeßketten im Bereich Energie, Stoffe und Transporte durch einen modularen Aufbau übersichtlich ab. Es umfaßt wichtigste Technikdaten, Umweltparameter (Emissionen), Kostendaten, eine Kenngröße zum Betriebsort (Ortsbezug) sowie Hinweise zu Datenherkunft und -qualität.

Dies alles wird in einer Datenbank verwaltet (vgl. folgende Abbildung).



Die GEMIS-Datenbasis umfaßt Grunddaten zu

- **Bereitstellung von Energieträgern** (Prozeßketten- und Brennstoffdaten) - neben fossilen Energieträgern (Stein- und Braunkohle, Erdöl, Erdgas), regenerativen Energien, Hausmüll und Uran auch sog. Nachwachsende Rohstoffe (schnellwachsende Hölzer, Chinagrass, Raps, Zuckerhirse) sowie Wasserstoff
- Technologien zur Bereitstellung von **Wärme- und Strom** (Heizungen, Warmwasser, Kraftwerke aller Größen und Brennstoffe, Heizkraftwerke, BHKW...)
- **Stoffbereitstellung** (vor allem Grundstoffe und Baumaterialien) inklusive deren vorgelagerter Prozesse (bei Importen auch im Ausland)
- **Transportprozessen**, d.h. Personenkraftwagen (für Benzin, Diesel, Strom, Biokraftstoffe), Öffentliche Verkehrsmittel (Bus, Bahn) und Flugzeuge sowie Prozesse zum Gütertransport (Lastkraftwagen, Bahn, Schiffe und Pipelines).

Die GEMIS-Datenbasis enthält für alle diese Prozesse

- Kenndaten zu Nutzungsgrad, Leistung, jährliche Auslastung, Lebensdauer,
- Luftschadstoff- und Treibhausgasemissionen
- feste und flüssige Reststoffe sowie den Flächenbedarf.

GEMIS kann zudem *Kosten* analysieren - die entsprechenden Kenndaten der Brenn- und Treibstoffe sowie der Energie- und Transportprozesse (Investitions- und Betriebskosten) sind in der Datenbasis ebenfalls enthalten.

Als weitere Teile der Datenbank werden in GEMIS 3.0 auch gespeichert:

- Elementaranalysen von Brenn- und Treibstoffen
- Daten zur relativen Treibhauswirksamkeit von Klimagasen,
- Informationen zu allgemeinen Kostendaten (Kapitalzins) sowie
- Kennwerte für externe Kosten von Luftschadstoffen und Treibhausgasen.

Zur Erleichterung der Datenreferenzierung können auch Literaturhinweise und andere Datenquellen erfaßt und mit den anderen Daten verknüpft werden, sodaß Dritte den Ursprung der Daten nachvollziehen können.

Alle Einträge in der GEMIS-Stammdatenbasis sind gegen Änderungen durch Nutzer geschützt - damit wird die Integrität der Originaldaten gewahrt.

Die gesamte Datenbasis kann von NutzerInnen jedoch durch Kopieren vorhandener Datensätze und anschließende gezielte Anpassung oder durch vollständige Neueingabe eigener Daten **beliebig erweitert** werden.

Dabei können NutzerInnen ihre Datenanpassungen unter einer eigenen Bezeichnung der „Datenquelle“ speichern und so gezielt zusammenfassen (siehe unten 2.2).

Die vom Öko-Institut definierten **Stammdaten** in der Datenbasis von GEMIS 3.0 beruht auf einer ausführlichen Literaturrecherche, Befragungen von einschlägigen Unternehmen sowie eigenen Abschätzungen, die 1987 mit GEMIS 1.0 begonnen (siehe ÖKO/GhK 1989) und nunmehr seit 10 Jahren gepflegt und erweitert werden (siehe ÖKO/GhK 1992 ; ÖKO 1994).

Wichtige Grundlagen sind dabei

- „Energy Technology Characterizations“, US Department of Energy (1980-1983, 1988)
- „Comparative Assessment of Environmental Impacts of Energy Systems (COMPASS)“, OECD (1983-1986)
- „Environmental Effects of Electricity Generation“, World Energy Conference (1988)
- „Emissions of greenhouse gases from transportation fuels and electricity - Final Report, M. DeLuchi, Princeton University, Princeton 1991
- „Ansatzpunkte und Potentiale zur Minderung des Treibhauseffektes aus Sicht der fossilen Energieträger“, Deutsche Wissenschaftliche Gesellschaft für Erdöl, Erdgas und Kohle e.V. (DGMK), DGMK-Projekt 448-2, Hamburg 1992
- Treibhausgas-Inventarstudien verschiedener Länder von OECD/IPCC (1991-1996)
- „Öko-Inventare von Energiesystemen“, Studie der Gruppe Energie-Stoffe-Umwelt an der ETH Zürich (1992-1996)
- Studien des Öko-Instituts im Rahmen des BMFT-IKARUS-Projekts (siehe ÖKO 1992, 1993a-c)

Für die Aktualisierung insbesondere der Stoffdaten wurde eine Vielzahl von Ökobilanzen und Produktlinienanalysen verwendet, die im Einzelnen in der Datenbasis von GEMIS 3.0 ausgewiesen sind.

Die Gesamtheit aller Daten in GEMIS 3.0 kann aus dem Computermodell im **dBase-Format exportiert** werden - dabei werden alle Kenndaten inklusive der Referenzen so gespeichert, daß auch andere Programme die Daten lesen können.

Ein Import von Daten ist jedoch aufgrund der internen Logik und des Schutzes der Stammdaten nicht implementiert.

2.1 Neu in GEMIS: Emissionsminderungstechniken

Gegenüber der bisherigen Version 2.1 von GEMIS ist in der neuen Version 3.0 die Modellierung von eigenen Prozessen zur Emissionsminderung von Luftschadstoffen und Treibhausgasen möglich, mit der das Modell das modulare Konzept der Prozesse nochmals erweitert:

Wird z.B. ein thermisches Kraftwerk mit einer Entschwefelungsanlage betrieben, so kann dies in GEMIS durch die einfache Verknüpfung des Prozesses für das Kraftwerk mit dem für die Entschwefelung abgebildet werden - und dabei wird die erzielbare Emissionsminderung, entstehende Zusatzkosten, ggf. anfallende zusätzliche Reststoffe sowie der Hilfsenergieaufwand **automatisch** bestimmt.

Durch die neue Datenstruktur kann GEMIS sogar die „richtige“ Größe der Emissionsminderungstechnik automatisch bestimmen und so Fehlerquellen minimieren.

In der Datenbasis von GEMIS 3.0 sind schon eine ganze Reihe von Emissionsminderungstechniken für Luftschadstoffe enthalten - mit allen Informationen zu Wirksamkeit, Kosten, entstehenden Reststoffen und Hilfsenergiebedarf.

Diese Prozesse können NutzerInnen direkt mit eigenen Verbrennungsprozessen (z.B. thermischen Kraft- und Heizkraftwerken, Heizungen) durch einen Mausklick verbinden. NutzerInnen können auch Kopien der Emissionsminderungsprozesse machen und deren Kenndaten an eigene Informationen anpassen.

2.2 Neu in GEMIS: „Fremde“ Daten

Als weitere Neuerung wurden in GEMIS 3.0 neben den vom Öko-Institut definierten „Stamm“daten auch interessante Daten von Dritten mit in die Datenbank aufgenommen:

- Energieprozesse (Kraft- und Heizkraftwerke, Kessel, Heizungen) aus dem IKARUS-Projekt des Bundesforschungsministeriums,
- Verkehrsprozesse (Pkw, Lkw) aus einer Datenbank des Umweltbundesamts
- Prozesse aus der Landwirtschaft und Ernährung aus einer Studie der Gesamthochschule Kassel für die Klima-Enquête-Kommission

Alle Datensätze in GEMIS 3.0 haben nun einen Eintrag zur **Datenquelle**, so daß NutzerInnen gezielt die Quelle auswählen können, mit der sie arbeiten wollen. Auch „Fremddaten“ sind kopierbar und können danach beliebig angepaßt werden.

In künftigen Aktualisierungen der Datenbasis werden weitere Drittensätze aufgenommen, z.B. den GEMIS-2.1-Datensatz der Elektrizitätswirtschaft (siehe Exkurs vor Abschnitt 4).

Erzeugen NutzerInnen eigene Daten durch Kopieren von Stammdaten oder Neueingabe, können sie selbst definierten Datenquellen zugeordnet werden, sodaß zwischen den Datenquellen unterschieden werden kann. GEMIS kann so eingestellt werden, daß nur Datensätze einer gewählten „Quelle“ angezeigt werden.

2.3 Neu in GEMIS: Eigene Schadstofflisten

In GEMIS Version 2.1 konnten die betrachteten Umweltaspekte über *nutzerdefinierte* Emissionen und Reststoffe praktisch beliebig erweitert werden - jedoch zeigte sich, daß nur wenige AnwenderInnen diese Option nutzen.

In GEMIS 3.0 wurde die Liste der „fest“ vorhandenen Umweltaspekte erheblich erweitert (siehe unten 2.4), sodaß die meisten Ansprüche von AnwenderInnen nunmehr schon durch den Stammdatensatz abgedeckt werden können.

Um den NutzerInnen dennoch eine Flexibilität für eigene weitere Schad- und Reststoffe anzubieten, enthält GEMIS 3.0 nunmehr jeweils fünf „frei belegbare“ Einträge in den Listen für Luftschadstoffe sowie feste und flüssige Reststoffe.

Für die „freien“ Einträge lassen sich bei allen Prozessen Emissionsdaten eingeben - und in der Ergebnisberechnung auf Wunsch ausweisen.

2.4 „Was hinten herauskommt“: Ergebnisse von GEMIS

In GEMIS 3.0 wurde die Liste von Umweltaspekten nochmals erweitert:

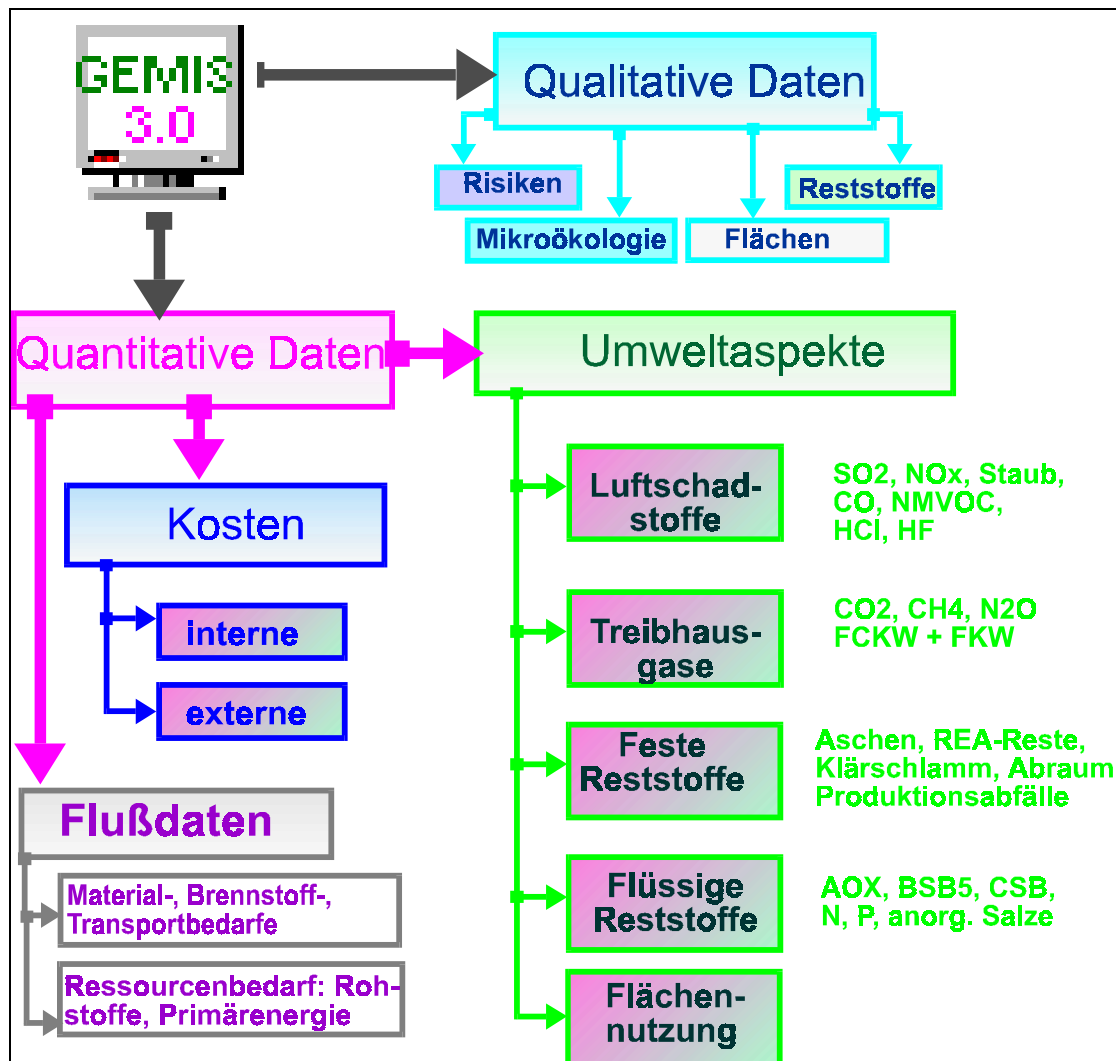
- Bei den **Luftschadstoffen** wurden NH_3 und H_2S aufgenommen, für alle sauren Schadgase wird ein SO_2 -Äquivalent berechnet
- Die **Treibhausgase** umfassen alle Klimagase und CO_2 -Äquivalente
- Die **festen Reststoffe** wurden um Klärschlamm, Produktionsabfälle und Abraum ergänzt
- Die neu aufgenommenen **flüssigen Reststoffe** umfassen die Summenparameter AOX, BSB5, CSB sowie N, P und anorganische Salze
- GEMIS 3.0 bestimmt für Szenariorechnungen auch den **Ressourcenbedarf**, wobei zwischen Primärenergien und Rohstoffen sowie Anteilen aus Sekundärnutzung (z.B. Abwärmenutzung, Stoffrecycling) unterschieden wird.
- Der Ressourcenbedarf wird als Summe aller Primärenergien (**kumulierter Energieaufwand**), Summe aller Rohstoffe (Gesamtmasse⁹) sowie disaggregiert nach einzelnen Primärenergien und Rohstoffen ausgegeben

Eine neue Analysemöglichkeit kann außerdem alle Umsätze, die in Szenariorechnungen bei Energie-, Stoff- und Transportprozessen auftreten, einzeln anzeigen und die jeweiligen Ursachen darstellen.

Damit lassen sich die komplexen Stoff- und Energieflüsse beliebig genau disaggregieren.

⁹ Anders als im MIPS-Ansatz des Wuppertal-Instituts wird in der von GEMIS berechneten Gesamtrohstoffnachfrage nicht Verbrennungsluft und Masse der Schad- und Reststoffe einbezogen, da eine solche Aggregation wenig aussagekräftig ist.

Die gesamten Ergebniskategorien von GEMIS 3.0 zeigt nochmals folgendes Bild.



Alle Ergebnisse aus GEMIS 3.0 können zudem nach Ortsbezug (Länderkennung) und Datenqualität der verursachenden Prozesse disaggregiert werden.

Die Resultate aus GEMIS-Rechnungen lassen sich neben Tabellen auch in Form von ASCII-Dateien speichern, sodaß sie in anderen Anwendungen weiterverarbeitet werden können (z.B. in Tabellenkalkulationen).

GEMIS erzeugt auch Grafiken (Histogramme) der Ergebnisse und kann diese über die WINDOWS®-Zwischenablage an Fremdprogramme ausgeben.

3. Anwendungen von GEMIS

GEMIS erlaubt vielfältige Anwendungen - sowohl im analytisch-wissenschaftlichen wie auch im planerisch-politischen Raum. Diese Anwendungen erfolgen durch verschiedenste NutzerInnen im In- und Ausland, wobei letztere die **englische Version TEMIS** verwenden.

3.1 Anwendung für Energie- und Klimaschutzkonzepte

Ein wichtiges Anwendungsfeld für GEMIS sind kommunale und regionale Energiekonzepte, bei denen die zukünftige Umgestaltung von Energiebereitstellung und Energienutzung interessiert.

Durch Verwendung der Prozeßdaten der GEMIS-Datenbank können kann dabei einerseits die **heutige Situation** erfaßt werden - in einem sog. IST-Szenario werden dabei z.B. die Anteile einzelner Heizsysteme (z.B. Ölheizung, Gas, Fernwärme) an der Wärmeversorgung eines Industriebetriebs, Neubaugebiets oder einer ganzen Kommune eingegeben und mit GEMIS die hieraus resultierenden Umweltbelastungen berechnet.

Andererseits können dann die in Zukunft möglichen **Änderungen** der IST-Situation (z.B. Nahwärme-Ausbau, Umrüstung von Heizwerken auf Kraft-Wärme-Kopplung, Solarenergie- und Biomasse-Einsatz) in einem **zweiten** (oder mehreren alternativen) **Szenario** erfaßt und der heutigen Situation gegenübergestellt werden.

Die Szenarien können neben der Wärme auch die Stromnachfrage berücksichtigen und dabei die **Energieeinsparung** sowohl wärme- wie auch stromseitig als "Energiequelle" einbezogen werden kann.

Die orientierende Kostenbilanz in GEMIS erlaubt, eine erste Einschätzung der wirtschaftlichen Wirkungen alternativer Energiepläne zu gewinnen, die allerdings bei der Umsetzung von Projekten durch detailliertere Wirtschaftlichkeitsanalysen ergänzt werden sollte.

GEMIS kann im kommunalen und regionalen Raum solche Energie-, Verkehrs- und Stoff-szenarien bestimmen, die einem vorgegebenen Umweltziel - z.B. eine mittelfristige Reduktion der CO₂-Emissionen - genügen können. Durch die Einbeziehung auch des Verkehrs- und Abfallbereich sowie die Materialbeschaffung von Kommunen in diese Betrachtung läßt sich ein **integriertes Klimaschutzkonzept** verwirklichen. Beispiele für solche Anwendungen sind u.a. Freiburg und das Saarland.

Die Einbeziehung einer klassischen Wirtschaftlichkeitsrechnung in GEMIS erlaubt, auch einen direkten Vergleich der herkömmlichen (einzelwirtschaftlichen) Kosten mit den Umwelteffekten durchzuführen, also z.B. die Mehrkosten einer ökologisch orientierten Energiestrategie zu ermitteln.

Mit GEMIS werden allerdings auch externe Umwelteffekte der Energienutzung größenordnungsmäßig in ökonomischer Hinsicht bewertbar, womit sich z.B. eine Landes- oder kommunale Förderung für erneuerbare Energiesysteme und Energieeinsparung begründen läßt.

3.2 Szenariengestützte Bewertung

Nach der Eingabe der Szenarien dauert es wenige Sekunden, bis die Grunddaten vom Computer verarbeitet werden. Ergebnis von - genauen oder geschätzten - Szenarien ist eine Bilanz für die in GEMIS enthaltenen Umweltaspekte über die gesamte Kette bis zur Primär-energie- und Rohstoffgewinnung sowie differenziert nach dem Ort der jeweiligen Belastung. Das GEMIS-Programm liefert ein Umweltprofil für die Szenarien - allerdings besteht dieses Profil aus Einzelwerten für Schadstoffe und Belastungen. Eine Gewichtung und Aggregation erfolgt nicht, vielmehr bietet GEMIS **Bewertungshilfen** an (z.B. SO₂- und CO₂-Äquivalente, externe Kosten).

Grundidee moderner Verfahren ist, **mehrere** alternative Szenarien über die zukünftigen Entwicklungsoptionen zu erstellen, die **jeweils ein** Bewertungskriterium (Umweltentlastung, Wirtschaftlichkeit) optimal erfüllen.

Aus dem **Vergleich** der Szenarien lassen sich dann die Elemente bestimmen, die robust gegenüber mehrfacher Zielsetzung (z.B. Umweltentlastung + geringe Kosten) sind, und auch die Tradeoffs einer maximalen Erfüllung des einen Ziels gegenüber anderen Zielen ermitteln.

Hier zeigt sich die Stärke von GEMIS: der Computereinsatz erlaubt es, schnell solche Szenarien abzubilden und verschiedene Gewichtungen "durchzuspielen". Darüber hinaus können, unterstützt durch GEMIS, auch die umweltbezogenen Schwachstellen eines Szenarios ermittelt und durch Variation - z.B. durch Emissionsminderungstechnik - ausgebessert werden.

Somit ist die Umweltbewertung von Szenarien kein Einmal-Durchlauf, sondern ein **rekursiver Prozeß**. Die Zeitersparnis durch den Computer sollte für Entwurf, Diskussion und Bewertung von Szenarien genutzt werden.

3.3 Anwendung in der Energie- und Umweltberatung

GEMIS läßt sich in der Energie- und Umweltberatung als Instrument zur Information und Entscheidungsunterstützung einsetzen. Wenn die Beratenen keine näheren Angaben über z.B. Heizungen haben, werden die Standard-Datensätze verwendet. Liegen spezielle Informationen vor, kann die nutzerspezifische Datenanpassung noch während der Beratung im Dialog erfolgen und so eine konkrete Aussage zu den Umweltaspekten erfolgen - hierbei werden Kopien der Stammdaten erstellt und entsprechend der jeweiligen Situation angepaßt.

3.4 AnwenderInnen von GEMIS

Seit der Veröffentlichung der ersten GEMIS-Version in 1989 ist der Kreis der NutzerInnen von GEMIS kontinuierlich gewachsen. Die 1996 registrierten AnwenderInnen von GEMIS 2.1 umfassen rund 500 Adressen aus dem deutschen Sprachraum, durch die parallel erstellte englische Version von GEMIS ist der Kreis deutlich über Deutschland hinaus gewachsen.

Im Zuge des Beta-Tests von GEMIS 3.0 (Sommer bis Ende 1996) und der nachfolgenden Freigabe des Programms über das Internet ist die Nutzerzahl weiter gestiegen.

Zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Broschüre stellt sich die Verbreitung von GEMIS und TEMIS sowie des für Entwicklungsländer entwickelten und auf GEMIS basierenden EM¹⁰ wie folgt dar:

Westeuropa

- Deutschland: ca. 500 NutzerInnen, darunter Behörden, Energieversorgungsunternehmen, private und öffentliche Forschungsinstitute sowie Hoch- und Fachhochschulen, Ingenieurbüros, Städte und Gemeinden
- Dänemark und Finnland: jeweils 5-10 NutzerInnen
- Großbritannien: ca. 20 NutzerInnen, darunter 10 Städte
- Italien: ca. 20 NutzerInnen von TEMIS, vorwiegend Städte und Gemeinden sowie Forschungsinstitute (Länder-Datenbasis erstellt durch Istituto de l’Ambiente, finanziert durch das dortige Umweltministerium)
- Luxemburg: ca. 10 NutzerInnen von GEMIS (Länder-Datenbasis erstellt durch Mouvement Ecologique, finanziert durch das dortige Umweltministerium)
- Niederlande: ca. 10 NutzerInnen von TEMIS (Länder-Datenbasis erstellt durch EVU-Forschungsinstitut KEMA)
- Österreich: ca. 50 NutzerInnen, vorwiegend Städte und Gemeinden sowie Forschungsinstitute (Länder-Datenbasis durch Umweltbundesamt erstellt)
- Portugal, Schweden, Schweiz: jeweils 5-10 NutzerInnen

Mittel- und Osteuropa

- Polen, Slowenien (TEMIS)
- Bulgarien, Kroatien, Rumänien (EM)
- Tschechische Republik (eigene GEMIS-Datenbasis)

andere Länder

- USA: Energieministerium und nationale Energieforschungsinstitute sowie mehrere Städte und EVU (TEMIS)
- Japan: Energieforschungsinstitute (TEMIS)
- Weltbank, bilaterale Geber, Entwicklungsländer: Nutzung des EM durch internationale Consultingfirmen und in mehr als 10 Ländern (u.a. China, Indien, Indonesien, Marokko, Simbabwe, Südafrika, Südpazifik)

¹⁰ Das Environmental Manual for Power Development (kurz: EM) wurde 1993-1995 vom Öko-Institut für die Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit GmbH (GTZ) und die Weltbank entwickelt. Die aktuelle EM-Version 1.0c wird derzeit im Rahmen eines ESMAP-Projektes gemeinsam mit der GTZ in EM-Phase III weltweit verbreitet.

Das Spektrum der AnwenderInnen ist sehr groß, die Anwendungen reichen - soweit veröffentlicht bzw. zugänglich - von einfacher Nutzung des Modells als „Datenserver“ für eigene Studien¹¹ bis hin zu komplexen Analysen von Szenarien. Der erfreuliche Trend zur Erstellung weiterer nationaler Datenbasen, der 1990 mit TEMIS in Großbritannien und USA begann und mittlerweile auch in Westeuropa fortschreitet, wird die Anwendungen des Computermodells in diesen Ländern sicher ausdehnen. Dies wird durch die neuen GEMIS-Optionen zum „Ortsbezug“ und der Eingabe der jeweiligen „Datenquelle“ unterstützt.

In Deutschland wird GEMIS derzeit überwiegend von Landesbehörden, kommunalen Umweltämtern, Energieagenturen und Ingenieurbüros sowie in der Forschung und Lehre verwendet.

Die Vielzahl von GEMIS-AnwenderInnen in deutschen Energieversorgungsunternehmen (über Stadtwerke bis hin zu RWE und Ruhrgas) hat 1996 durch die Erstellung eines eigenen GEMIS-Datensatzes durch die Vereinigung der deutschen Elektrizitätswirtschaft (VdEW) im GEMIS-2.0-Format sicher weiteren Auftrieb erhalten - dies wird von unserer Seite ausdrücklich begrüßt.

Zum VdEW-Datensatz muß jedoch eine Reihe von **kritischen Anmerkungen** gemacht werden, die seine Verwendbarkeit aus unserer Sicht **stark einschränken** (siehe Kasten weiter unten).

Durch das neue Vertriebskonzept von GEMIS 3.0 über das Internet ist es nunmehr möglich, auch ohne großen Aufwand interessante Ergebnisse von GEMIS-Anwendungen Dritter zur Verfügung zu stellen und über neue Daten zu berichten.

Wir bitten daher alle GEMIS-AnwenderInnen, uns oder das HMUEJFG über entsprechende Arbeiten zu informieren, damit wir dies auf den GEMIS-Internetseiten an Interessierte weitergeben können.

¹¹ z.B. das schweizerische Umweltamt mit den „Ökobilanzen für Packstoffe“, die ETH Zürich in den Öko-Inventaren von Energiesystemen, das US-amerikanische Energieministerium und das Ökobilanz-Werkzeug UMBERTO

3.5 Exkurs: Der VdEW-Datensatz für GEMIS 3.0

Die Vereinigung der deutschen Elektrizitätswirtschaft (VdEW) hat im Jahr 1995 die Firma Fichtner Development Engineering (FDE) beauftragt, auf Basis von GEMIS 2.0 einen eigenen Datensatz für EVU vorzulegen, der insbesondere die GEMIS-Daten für Energieanlagen und deren vorgelagerte Prozeßketten überprüfen und ggf. anpassen sollte. Im Jahr 1996 wurde das Ergebnis dieser Arbeit von der VdEW veröffentlicht und als GEMIS-Datensatz (im Format für GEMIS 2.0) Dritten zum Kauf angeboten.

Nunmehr liegt der VdEW-Datensatz auch im Format 3.0 vor und wurde in die GEMIS-Stammdaten aufgenommen. Diese Datensätze sind **hellblau** gekennzeichnet und tragen im Namen einen „*“ am Ende. Außerdem können die Datensätze problemlos durch den Datenbankfilter *Quelle* mit „VdEW“ identifiziert und getrennt von anderen Daten angezeigt werden.

Die Dokumentation dieses VdEW-Datensatzes ist als eigene Hilfe-Datei mit dem Namen G3-VDEW.HLP im GEMIS-Lieferumfang enthalten und kann auch von den GEMIS-Internet-Seiten bezogen werden.

An der Erstellung dieses VdEW-Datensatzes war das Öko-Institut **nicht** beteiligt - wir wurden von der VdEW zwar vor Veröffentlichung zu einer Diskussion der wichtigsten Ergebnisse eingeladen, unsere kritischen Anmerkungen gingen jedoch nicht weiter in die Arbeit ein.

Im Kern hat die Arbeit von FDE für die VdEW die wichtigsten GEMIS-Daten im Bereich der Energieträger und Gütertransporte **bestätigt** - es gibt zwar geringfügig andere Auffassungen zur Anrechnung von CO₂- und CH₄-Emissionen im Bereich der Öl- und Erdgas- sowie der Uran-Vorketten, die jedoch insgesamt nicht sehr ergebniswirksam sind. Entsprechenden Anregungen aus der FDE-Arbeit werden wir im Rahmen der künftigen GEMIS-Aktualisierung nachgehen.

Die **ergebniswirksamen Hauptunterschiede** zwischen dem GEMIS-Stammdaten und den VdEW-Daten sind folgende:

- VdEW rechnet für Heizstrom mit einem erheblichen Atomstromanteil - immerhin aber weniger als in früheren Studien. Dies führt gegenüber den GEMIS-Stammdaten zu einer Senkung der Emissionen von Elektro-Nachtspeicherheizungen und Elektrowärmepumpen (insbesondere bei CO₂).
Die VdEW-Annahmen zu den AKW-Anteilen bei der Heizstrombereitstellung sind aus unserer Sicht nicht belastbar und **deutlich** zu hoch.
- VdEW rechnet bei Prozessen mit Kraft-Wärme-Kopplung mit einer geringen Gutschrift für den gekoppelt erzeugten Strom, und gleichzeitig mit geringen Stromkennzahlen. Damit steigen die wärmebezogenen Emissionen von BHKW und Heizkraftwerken gegenüber den GEMIS-Stammdaten an. Die VdEW-Daten sind u.E. tendenziös gewählt und widersprechen den Erfahrungen aus der deutschen BHKW-Praxis, wo wesentlich höhere Stromkennzahlen auftreten. Auch die Verdrängung von Strom aus Kohle-Kondensationskraftwerken durch KWK-Strom ist weitaus praxisnäher als die VdEW-Annahme, die durchschnittliche Stromerzeugung (inkl. AKW und Wasserkraft) würde durch KWK-Strom ersetzt: Der KWK-Zubau in Ostdeutschland zeigt ja deutlich, daß dies zu Lasten von Kohlestrom geht.

Insgesamt erscheint der VdEW-Datensatz für GEMIS als ein wichtiger Schritt in Richtung Akzeptanz von DV-gestützten Umweltvergleichen durch die Stromwirtschaft - die früher oft angefeindete Methodik von GEMIS wird ja nunmehr selbst verwendet.

Die überwiegende Bestätigung des GEMIS-Stammdatensatzes (aus Version 2.0+3.0) durch die VdEW kann jedoch nicht darüber hinwegtäuschen, daß bei den Annahmen zur Elektrowärme und Kraft-Wärme-Kopplung die VdEW noch u.E. *tendenziöse Annahmen* trifft, die *einseitig zugunsten* von Elektrizität aus zentralen Erzeugungsanlagen wirken.

Von einer breiten Verwendung dieser Daten muß daher solange abgeraten werden, die diese entscheidenden Schwachstellen nicht behoben sind.

Um den VdEW-Datensatz einem breiten NutzerInnenkreis zur eigenen Bewertung zur Verfügung zu stellen, wurde im Rahmen der Aktualisierung zu GEMIS 3.08 für die Xmas-edition 1998 (siehe Abschnitt 5) die Daten der VdEW als „Fremddaten“ in GEMIS aufgenommen.

Dann können sich alle AnwenderInnen selbst ein Bild von der Datenlage im direkten Vergleich machen und die tatsächlichen Unterschiede in entsprechenden Variantenrechnungen ermitteln.

Wir hoffen, daß zur weiteren Diskussion um den VdEW-Datensatz auch andere Energieunternehmen und private Betreiber eigene Daten bereitstellen, die bei den Prozessen mit Kraft-Wärme-Kopplung für eine sachlich geprägte, breite Gegenüberstellung von Annahmen und Praxis erlauben. Für entsprechende Hinweise sind wir dankbar.

Im Bereich der Zurechnung von Emissionen zum Heizstrom sowie für Elektrowärmepumpen wird die Diskussion weitergehen. Beachtlich bei den VdEW-Daten ist hier immerhin, daß trotz unrealistischer AKW-Anteile am Heizstrom die SO₂- und CO₂-Emissionen von Elektro-speicherheizungen nun auch nach VdEW-Daten **über denen von Ölheizungen** liegen - und erst recht höher als die von Gas- und Nah/Fernwärme-Heizungen.

Damit ist die lange von Seiten der Stromwirtschaft gemachte Behauptung, Heizstrom sei umweltfreundlicher als Öl, nun wohl endgültig widerlegt.

In den laufenden Arbeiten zu GEMIS 3.x wird versucht werden, einen einheitlichen Datensatz z erstellen - insbesondere werden wir Daten zu Wärmepumpen aktualisieren (s. Abschnitt 5).

4. Ausgewählte Ergebnisse von GEMIS

Im GEMIS-Projekt wurden Vergleichsrechnungen für Energie-, Verkehrs- und Stoffprozeßketten durchgeführt. Der folgende Abschnitt gibt einen Überblick zu ausgewählten Ergebnissen (Wärme, Strom, Kraft-Wärme-Kopplung, Verkehr, Stoffbereitstellung). Im kostenlos erhältlichen GEMIS-Computerprogramm können diese Vergleichsrechnungen leicht nachvollzogen werden und auch detailliertere Ergebnisse ermittelt werden.

4.1 Die Bedeutung der vorgelagerten Prozesse

Wie schon im Abschnitt 1 dargestellt, müssen die z.T. komplexen Vorketten von Energie-, Stoff- und Transportsystemen mit berücksichtigt werden, wenn eine **ganzheitliche** Umweltanalyse erfolgen soll. Wie stark wirken sich diese Vorketten nun aus ?

In GEMIS 3.0 werden die Ergebnisse von Szenario-Rechnungen so aufgeteilt, daß stets die in einem **bestimmten Land** entstehenden Umwelteffekte einerseits und die **überall sonst** entstehenden Effekte getrennt ausgewiesen werden. Standardmäßig wird in GEMIS 3.0 der Ortsbezug „Deutschland“ (EU-D) gewählt.

Die Bedeutung der Vorketten ist aber nicht nur in der Länderabgrenzung interessant, sondern auch in quantitativer Hinsicht. Zwei Beispiele sollen dies verdeutlichen.

Rapsöl als nachwachsender Rohstoff wird oft als umweltfreundlicher Brenn- und Treibstoff bezeichnet, der insbesondere keine direkten CO₂-Emissionen bei der Verbrennung aufweist.

Jedoch muß Rapsöl wie andere Energieträger auch zuerst geerntet, transportiert und aufbereitet werden, bevor es genutzt werden kann.

Wird Rapsöl in einem Diesel-Blockheizkraftwerk (BHKW) eingesetzt, so kann daraus Strom und Wärme erzeugt werden. Interessieren nur die Emissionen bezogen auf die Stromerzeugung, kann für die nutzbare Abwärme eine Gutschrift (sog. Wärmebonus) erfolgen - dies wird näher im Abschnitt 4.3 erläutert.

Wie groß sind nun die Treibhausgas-Emissionen bei der Stromerzeugung aus Rapsöl, wenn die vorgelagerte Prozeßkette mit berücksichtigt wird ?

Die folgende Tabelle zeigt die entsprechend zusammengefaßten Werte, die GEMIS 3.0 für ein Rapsöl-BHKW berechnet hat.

Dabei sind neben den CO₂-Emissionen auch die anderen direkten Treibhausgase (Methan - CH₄ und Lachgas -N₂O) mit berücksichtigt und insgesamt als CO₂-Äquivalente (Integrationszeitraum 100 Jahre) ausgedrückt.

in g/kWh _{el}	CO ₂	CO ₂ -Äqu.*
direkte Emission Rapsöl-BHKW	0**	10
<i>vorgelagerte Prozesse</i>		
Dieselmotor (Aussaat und Ernte)	65	65
Ammoniak-Herstellung (für Dünger)	41	41
Sonstige Vorketten (z.B. Hilfsstrom)	80	81
Raps-Düngung	0	524
Salpetersäure-Herstellung (für Dünger)	0	101
<i>Summe vorgelagert</i>	<i>105</i>	<i>737</i>
Summe brutto	105	747
Wärmebonus (Öl-Heizung)	-485	-488
Summe netto	-269	375

* = CO₂-Äquivalente für direktes THP, Integrationszeit 100 Jahre

** = keine anrechenbaren CO₂-Emissionen wg. nachwachsendem Rohstoff

Dies zeigt, daß für CO₂ die vorgelagerten Prozesse die Brutto-Emission zu 100% bestimmen. Durch die Gutschrift für ausgekoppelte Wärme ergeben sich sogar negative Gesamtemissionen, d.h. bei der Stromerzeugung mit einem Rapsöl-BHKW spart man CO₂-Emissionen ein.

Das Bild ändert sich jedoch, wenn die anderen Treibhausgase mit betrachtet werden: bei den CO₂-Äquivalenten dominieren wiederum die vorgelagerten Prozesse (Raps-Düngung und Düngerherstellung), jedoch ist ihre Summe deutlich höher als bei CO₂ alleine - der Wärmebonus führt nicht mehr zu negativen Emissionen, sondern zu Werten, die im Bereich eines modernen Erdgas-Kraftwerks liegen (vgl. unten Abschnitt 4.1).

Der Effekt, daß durch die vorgelagerten Prozesse scheinbare Umweltvorteile der direkten Anwendung z.T. deutlich reduziert werden, tritt nicht nur bei Nutzung des Rapsöl in BHKW auf - sondern auch, wenn Rapsöl als Treibstoff verwendet wird.

Dies zeigt die folgende Tabelle - diesmal in einer anderen Abgrenzung der vorgelagerten Prozesse, die zwischen Energie- und Stoff-Vorleistungen unterscheidet.

In g/P*km	CO ₂	CO ₂ -Äqu.*
direkte Emissionen Pkw	-**	5
<i>vorgelagerte Energieprozesse</i>	41	45
<i>vorgelagerte Stoffprozesse</i>	16	134
<i>- darunter:</i>		
Ammoniakherstellung	8	8
Roheisenherstellung	4	4
Brannkalk-Herstellung	4	4
Anbau Raps (Düngung)	-	99
Salpetersäure-Herstellung	-	19
<i>Summe vorgelagerte Prozesse</i>	<i>57</i>	<i>178</i>
Summe	57	184

* = CO₂-Äquivalente für direktes THP, Integrationszeit 100 Jahre

** = keine anrechenbaren CO₂-Emissionen wg. nachwachsendem Rohstoff

Die Tabelle zeigt deutlich, daß auch für den Rapsöl-Pkw die vorgelagerten Prozesse die Emissionen von Treibhausgasen dominieren - und daß neben den energiebedingten Vorleistungen gerade die Prozesse zu Stoffbereitstellung (Düngerherstellung) erhebliche Beiträge leisten. Auch beim Rapsöl-Pkw sind die Treibhausgas-Emissionen als CO₂-Äquivalente erheblich höher als allein die CO₂-Emissionen - damit relativiert sich die Klimafreundlichkeit solcher Fahrzeuge gegenüber Diesel- und Benzinmotoren erheblich (siehe unten Abschnitt 4.5).

Als zweites Beispiel zur Bedeutung der vorgelagerten Prozesse sollen wiederum ein BHKW dienen, diesmal jedoch für Biogas (aus Gülle) und Holzgas (aus Restholz-Hackschnitzeln). Als Schadstoff sollen Stickoxide (NO_x) betrachtet werden.

Die folgende Tabelle zeigt die Verteilung der direkten NO_x-Emissionen und die der vorgelagerten Prozesse, den Effekt des Wärmebonus sowie die Summen.

Zu beachten ist hier, daß Gülle und Holzgas aus Reststoffen gewonnen werden, also für den „Anbau“ - anders als beim Raps - keine eigenen Emissionen unterstellt wurden (zum Effekt bei Holzplantagen siehe unten Abschnitt 4.3).

NO _x [g/kWh _{e,l}]	Biogas-BHKW	Holzgas-BHKW
direkte Emission BHKW	0,24	0,36
<i>Vorgelagerte Prozesse</i>		
Biogasanlage (Hilfsenergie)	0,23	-
Dieselmotor (Hacken)	-	0,11
Lkw (Transport)	1,30	0,07
<i>Summe Vorkette</i>	<i>1,53</i>	<i>0,18</i>
Summe (brutto)	1,77	0,54
Wärmebonus (Öl-Heizung)	-0,22	-0,22
Wärmebonus (Öl-Vorkette)	-0,08	-0,08
Summe (netto)	1,47	0,24

Bei diesem Beispiel zeigt sich, daß die vorgelagerte Prozeßkette von Biogas mehr als 100% der direkten NO_x-Emissionen des BHKW und über 50% der Gesamtemissionen ausmacht, während die Vorkette beim Holzgas rund 1/3 der Brutto- und über 50% der Netto-Emissionen ausmacht.

Es zeigt sich, daß selbst bei einfachen Vorketten und ohne Anrechnung des Anbaus (Reststoffe !) die Vorketten eine erhebliche Bedeutung haben.

Bei konventionellen Brenn- und Treibstoffen auf Basis fossiler Energien sind in den Beispielen dargestellten Effekte aufgrund der gegenüber Biomasse höheren Energiedichte (Heizwerte) deutlich geringer, jedoch stets im Bereich von 5-20%, je nach Umweltaspekt. Bei den feste Reststoffen (insbesondere Abraum) und dem Wasserbedarf können aber auch hier die vorgelagerten Prozesse dominieren.

Diese kurzen Ausführungen sollen belegen, daß eine ausführliche Analyse des gesamten Lebensweges von Energie-, Stoff- und Transportprozessen aus Umweltsicht von erheblicher Bedeutung sein kann.

In den folgenden Unterabschnitten werden die Ergebnisse weiterer GEMIS-Szenarien dargestellt, wobei aus Platzgründen auf eine Differenzierung der Anteile von direkten Wirkungen und Vorketten-Effekten verzichtet wird¹².

¹² GEMIS-AnwenderInnen können die Szenarien mit dem Computermodell nachrechnen und die entsprechenden Detaildarstellungen selbst ermitteln. Die hier gezeigten Szenarien sind alle im GEMIS-Stammdatensatz enthalten.

4.2 Vergleiche von Systemen zur Strombereitstellung

Aus der Vielzahl möglicher Stromerzeuger in GEMIS 3.0 wurde für diesen Bericht zwei Szenarien erstellt, in denen jeweils eine Auswahl von Optionen enthalten ist, die 1 kWh Strom bereitstellen.

Das Szenario „Strom mit KWK“ enthält als 1. Option ein konventionelles großes Steinkohle-Kondensationskraftwerk mit 700-MW_{el} und Naß-Entschwefelung sowie DeNO_x, dessen Brennstoff den in Deutschland üblichen Mix von Vollwert- und Importkohle abbildet. Die 2. Option ist ein Kombi-Kraftwerk (GuD-Schaltung), das mit Kohlegas aus der integrierten Vergasung von Steinkohle betrieben wird. Auch hier ist der Brennstoff das Bundesmix von heimischer und Importkohle. Die 3. Option ist ein modernes Erdgas-GuD-Kraftwerk der 450-MW_{el}-Klasse mit Low-NO_x-Brennkammer. Als 4. Option wurde ein AKW mit Druckwasserreaktor (1300-MW_{el}) angenommen.

Alle folgenden Optionen sind **KWK-Systeme**, die Strom in Kraft-Wärme-Kopplung bereitstellen. In diesem Szenario wurde bei allen KWK-Anlagen zuerst alle Emissionen der Stromseite zugerechnet werden und dann ein Wärmebonus für die nutzbare Abwärme eingerechnet (jeweils auf Basis einer Ölheizung). Diese „Netto“-Definition von KWK-Prozessen ergibt die allein strombezogenen Emissionen, sodaß ein Vergleich mit „nur“-Stromerzeugern möglich ist¹³.

Optionen 5 und 6 sind jeweils große Entnahme-Kondensations-Heizkraftwerke (100 MW_{el}), die mit Naßentschwefelung und DeNO_x ausgerüstet sind. Option 5 nutzt Steinkohle (Mix heimisch/Import), Option 6 nutzt rheinische Braunkohle.

Die Optionen 7 bis 14 sind gasbetriebene KWK-Systeme verschiedener Technik und Leistung. Option 7 ist ein Mini-BHKW mit Magerbetrieb zur NO_x-Minderung (sog. TOTEM) mit nur 5 kW_{el}, während Optionen 8-11 herkömmliche Gasmotor-BHKW mit geregelterm 3-Wege-Kat darstellen (Leistung 50-500 kW_{el}). In Option 12 ist ein großes Gasmotor-BHKW (1 MW_{el}) mit Magerbetrieb zur NO_x-Minderung angesetzt.

Option 13 ist ein gasbetriebenes HKW mit Gasturbine und Abhitzekegel (10 MW_{el}), während Option 14 ein größeres Erdgas-GuD-Heizkraftwerk (100 MW_{el}) repräsentiert. In Option 15 ist ein kleines Dieselmotor-BHKW (100 kW_{el}) mit primärer NO_x-Minderung angenommen, in Option 16 ein großes Dieselmotor-BHKW (1 MW_{el}) mit SCR-DeNO_x.

Die letzten vier Optionen repräsentieren Biomasse in KWK - beginnend mit Option 17, in der ein BHKW mit Biogas aus einer Zentralanlage zur Vergärung von Gülle betrieben wird, und gefolgt von Option 18, in der Biogas aus der zentralen Vergärung von getrennt gesammeltem Biomüll ein mittleres BHKW (250 kW_{el}) mit 3-Wege-Kat versorgt.

Option 19 ist ein Holzgas-BHKW, dessen Brennstoff aus der dezentralen Vergasung von Holzhackschnitzeln aus Restholz stammt. Option 20 beschließt das erste Szenario mit einem kleinen Dieselmotor-BHKW, das mit Rapsöl betrieben wird.

Die folgenden Tabellen zeigen die Ergebnisse des Szenarios „Strom mit KWK“.

¹³ vgl. zur Brutto-Betrachtung ohne Gutschriften weiter unten Abschnitt 4.4.

Luftschadstoffemissionen im Szenario „Strom mit KWK“

[g/kWh]	SO ₂	NO _x	Staub	CO	NMVOC
Steinkohle-KW-mix	0,70	0,56	0,03	0,22	0,04
Kohlegas-GuD-KW	0,34	0,83	0,02	0,73	0,05
Gas-GuD-KW	0,02	0,61	0,01	0,34	0,03
Steinkohle-HKW	0,07	0,00	0,01	-0,16	-0,14
Braunkohle-HKW rheinisc	-0,31	0,46	0,04	-0,11	-0,14
Braunkohle-HKW Lausitz	-0,08	0,37	0,62	-0,17	-0,15
Gas-BHKW-Mager-05	-1,00	1,22	-0,01	0,68	-0,14
Gas-BHKW-Kat-50	-0,92	0,29	-0,01	0,24	-0,13
Gas-BHKW-Kat-110	-0,83	0,29	-0,01	0,24	-0,12
Gas-BHKW-Kat-250	-0,69	0,30	-0,01	0,26	-0,09
Gas-BHKW-Kat-500	-0,69	0,28	-0,01	0,24	-0,10
Gas-BHKW-Mager-1000	-0,64	0,46	-0,01	0,26	-0,09
Gas-GT-HKW	-0,76	1,77	0,03	1,86	0,38
Gas-GuD-HKW	-0,45	0,45	-0,01	0,50	-0,06
Diesel-BHKW-klein	0,44	6,67	0,45	0,27	0,05
Diesel-BHKW-groß	0,51	1,52	0,43	1,87	0,09
Biogas-BHKW	-0,49	2,07	0,23	1,66	0,28
Biomüllgas-BHKW	-0,60	0,69	0,12	1,29	0,09
Holzgas-BHKW	-0,64	1,15	0,04	0,63	-0,04
Rapsöl-BHKW	-0,09	7,91	0,55	1,02	-0,10

Treibhausgasemissionen im Szenario „Strom mit KWK“

[g/kWh]	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO ₂ -Äquiv.
Steinkohle-KW-mix	907,0	4,6	0,1	1019
Kohlegas-GuD-KW	775,4	3,6	0,0	858
Gas-GuD-KW	377,0	1,1	0,0	404
Steinkohle-HKW	522,1	5,5	0,1	652
Braunkohle-HKW rheinisc	735,5	-0,1	0,1	760
Braunkohle-HKW Lausitz	595,8	-0,2	0,0	600
Gas-BHKW-Mager-05	31,6	3,9	0,0	124
Gas-BHKW-Kat-50	3,6	3,4	0,0	78
Gas-BHKW-Kat-110	27,8	3,2	0,0	98
Gas-BHKW-Kat-250	74,8	2,9	0,0	139
Gas-BHKW-Kat-500	57,8	2,8	0,0	120
Gas-BHKW-Mager-1000	84,3	2,8	0,0	151
Gas-GT-HKW	153,0	1,9	0,0	201
Gas-GuD-HKW	108,8	1,2	0,0	138
Diesel-BHKW-klein	319,0	0,0	0,0	327
Diesel-BHKW-groß	375,2	0,1	0,0	384
Biogas-BHKW	-394,6	0,1	0,0	-383
Biomüllgas-BHKW	-503,3	0,0	0,0	-498
Holzgas-BHKW	-429,4	0,0	0,0	-422
Rapsöl-BHKW	-268,6	0,4	2,1	375

CO₂-Äquivalente für 100 Jahre Integrationszeit, nur direkte Treibhauswirkung

Sowohl bei den Luftschadstoffen wie auch bei den Treibhausgasen ist die geringe Nettoemission der KWK-Prozesse - insbesondere mit Erdgas und Biomasse - deutlich zu erkennen. Sie liegen im Bereich bzw. sogar noch unter denen der Stromerzeugung mit AKW !

Kohle-HKW können zwar die Emissionen gegenüber der reinen Kohleverstromung deutlich senken, liegen jedoch erheblich über den anderen KWK-Anlagen. Die Vergasung von Kohle mit Nutzung im GuD-Kraftwerk senkt zwar die Emissionen leicht, aber weniger als die Option Kohle-HKW.

Erkennbar ist auch, das reine Erdgas-GuD-Kraftwerke erheblich höhere Emissionen aufweisen als Erdgas-KWK-Prozesse.

Die folgende Tabelle zeigt die entsprechenden Resultate für feste Reststoffe.

Feste Reststoffe im Szenario „Strom mit KWK“

[g/kWh]	Asche	REA-Resto	Prod.abfall	Abraum
Steinkohle-KW-mix	5,9	17,0	10,4	589
Kohlegas-GuD-KW	9,8	1,9	9,1	650
Gas-GuD-KW	0,0	0,0	0,7	11
Steinkohle-HKW	1,6	20,6	10,7	660
Braunkohle-HKW rheinisc	13,9	10,2	-0,9	9.235
Braunkohle-HKW Lausitz	12,5	18,5	-1,4	17.864
Gas-BHKW-Mager-05	-0,2	-0,3	-1,0	-52
Gas-BHKW-Kat-50	-0,2	-0,2	-1,0	-51
Gas-BHKW-Kat-110	-0,2	-0,2	-0,9	-44
Gas-BHKW-Kat-250	-0,2	-0,2	-0,6	-36
Gas-BHKW-Kat-500	-0,2	-0,2	-0,7	-36
Gas-BHKW-Mager-1000	-0,2	-0,2	-0,6	-34
Gas-GT-HKW	-0,2	-0,2	-0,6	-39
Gas-GuD-HKW	-0,1	-0,1	-0,3	-22
Diesel-BHKW-klein	-0,1	-0,1	-0,9	-29
Diesel-BHKW-groß	-0,1	-0,1	-0,7	-23
Biogas-BHKW	1,5	-0,2	153,5	-40
Biomüllgas-BHKW	1,0	-0,2	115,6	-48
Holzgas-BHKW	0,7	0,8	0,3	158
Rapsöl-BHKW	1,3	0,7	793,8	190

Deutlich erkennbar sind im Vergleich die hohen Asche- und Abraummengen der kohlebetriebenen Anlagen sowie die negativen Werte bei den gasbefeuerten HKW und BHKW.

Die Biogas- und Rapsöl-Anlagen weisen demgegenüber hohe Produktionsabfälle auf - diese können jedoch vergleichsweise einfach weitergenutzt werden.

Abschließend zeigt die folgende Tabelle die Ressourceninanspruchnahme durch die Optionen zur Stromerzeugung.

Ressourcenbedarfe im Szenario „Strom mit KWK“

Ressourcenbilanz	Primärener [kWh/kWh]	Rohstoffe [g/kWh]		Wasser	Fläche [cm ² /kWh]
		Erze	Mineralien		
Steinkohle-KW-mix	2,720	3,0	18,3	2912,7	0,03
Kohlegas-GuD-KW	2,280	1,8	4,7	1822,4	0,10
Gas-GuD-KW	1,930	3,6	8,0	717,8	0,02
Steinkohle-HKW	1,130	-4,7	18,2	1131,7	-0,07
Braunkohle-HKW rheinisc	1,530	-4,6	12,6	9198,1	0,16
Braunkohle-HKW Lausitz	1,140	-4,7	18,9	8413,1	0,11
Gas-BHKW-Mager-05	1,230	-2,1	17,1	-143,7	-0,08
Gas-BHKW-Kat-50	1,010	-2,4	11,6	-138,2	-0,08
Gas-BHKW-Kat-110	1,030	-1,9	13,1	-120,5	-0,07
Gas-BHKW-Kat-250	1,130	-1,2	10,5	-97,8	-0,05
Gas-BHKW-Kat-500	1,040	-1,4	10,2	-99,1	-0,05
Gas-BHKW-Mager-1000	1,130	-1,1	9,2	-91,4	-0,05
Gas-GT-HKW	1,590	-0,8	10,7	-104,3	-0,05
Gas-GuD-HKW	1,040	-0,1	7,5	-59,5	-0,03
Diesel-BHKW-klein	1,180	-4,4	3,9	-96,1	-0,01
Diesel-BHKW-groß	1,400	-3,8	0,7	-74,7	0,00
Biogas-BHKW	14,340	0,7	6,1	-98,2	-0,07
Biomüllgas-BHKW	10,130	-4,5	2,3	-131,5	1,31
Holzgas-BHKW	1,700	-3,6	1,8	214,3	0,22
Rapsöl-BHKW	1,950	-3,9	244,7	16650,6	1,64

Hier zeigen sich die großen Wasserbedarfe der Kondensationskraftwerke sowie die Einsparungen durch KWK-Anlagen. Auffallend sind auch die relativ großen Flächenbedarfe der Biomasse-Prozesse sowie deren hoher Primärenergiebedarf - dieser besteht jedoch ganz überwiegend aus (nachwachsender) Biomasse.

Die fossil befeuerten HKW haben demgegenüber geringere Bedarfe an Primärenergie, jedoch sind endliche Ressourcen betroffen. Die Mineralbedarfe der HKW sind höher als bei anderen Anlagen, dafür treten Einsparungen bei Erzen auf.

In einem zweiten Szenario „Strom einzeln“ werden weitere Stromsysteme aus GEMIS verglichen, jedoch ohne KWK-Anlagen.

Die erste Option im zweiten Szenario ist die Strombereitstellung aus dem gesamtdeutschen Kraftwerkspark **inklusive** aller Transport- und Verteilverluste bis zur Steckdose in Haushalten.

Das zweite Szenario repräsentiert den gesamtdeutschen Kraftwerkspark **ohne** Transport- und Verteilverluste, während die Optionen 3 und 4 den ost- bzw. westdeutschen Kraftwerkspark jeweils isoliert betrachten.

Option 5 ist wiederum das große Atomkraftwerk aus Szenario 1, das hier aus Vergleichsgründen mit aufgenommen wurde.

Die Optionen 6-8 stellen Braunkohle-Grundlastkraftwerke dar, die jeweils mit **westdeutscher** (Option 6) und ostdeutscher (Option 7+8) Rohbraunkohle betrieben werden.

Alle Anlagen haben Naßentschwefelung und primäre Maßnahmen zur NO_x-Minderung.

In Option 9 und 10 werden große Mittellast-Steinkohlekraftwerke mit einem Mix deutscher Vollwertkohle und Importkohle (Option 9) bzw. reiner Importkohle (Option 10) angenommen. Diese Anlagen der 700-MW_{el}-Klasse sind voll entschwefelt und entstickt.

Die Optionen 11 bis 13 vergleichen große Erdgas-Kraftwerke - in Option 11 ist es ein konventionelles Dampfturbinen-Kraftwerk, in Option 12 eine große Gasturbine und in Option 13 ein Kombikraftwerk in GuD-Schaltung.

Zu Vergleichszwecken werden in den Optionen 14 und 15 noch ein großes Schwerölpapfturbinenkraftwerk und eine Müllverbrennungsanlage (nur Stromerzeugung) aufgeführt, d.h. der bei der Verbrennungswärme entstehende Dampf erzeugt in einer Gegendruckturbine Strom.

In den Optionen 16-19 werden Strombereitstellungsprozesse mit regenerativen Energien abgebildet.

Dabei handelt es sich um ein großes Laufwasserkraftwerk (50 MW_{el}) sowie einen mittelgroßen Windpark (10 Anlagen mit je 500 kW_{el}) sowie dezentrale Photovoltaik-Anlagen (PV) mit monokristallinen und multikristallinen Siliziumzellen (jeweils 10 kW_{el}-Anlagen).

Die abschließende Option 20 zeigt einen *NegaWatt*-Prozeß für Strom: hier stellt eine Kombination von Stromsparlampen und Lichtleittechnik 80% „Einsparstrom“ bereitstellt, die restlichen 0,2 kWh Strom stammen aus dem lokalen Netz (gesamtdeutscher Kraftwerksmix inkl. Verteilverluste).

Die folgenden Tabelle zeigen die Ergebnisse der GEMIS-Rechnungen für das zweite Szenario.

Luftschadstoffemissionen im Szenario „Strom-einzeln“

[g/kWh]	SO ₂	NO _x	Staub	CO	NM VOC
Stromnetz-lokal-D	0,43	0,93	0,06	0,39	0,09
EI-KW-Park-D	0,41	0,90	0,05	0,36	0,09
EI-KW-Park-Ost	0,53	0,72	0,08	0,34	0,02
EI-KW-Park-West	0,39	0,92	0,05	0,36	0,10
AKW	0,12	0,15	0,03	0,05	0,01
BrK-KW-DT-rheinisch	0,45	0,82	0,11	0,23	0,02
BrK-KW-DT-Lausitz	0,73	0,73	0,09	0,20	0,01
BrK-KW-DT-Leipzig	0,68	0,68	0,10	0,19	0,01
StK-KW-DT-BRD-mix	0,70	0,56	0,03	0,22	0,04
StK-KW-DT-Import	0,73	0,83	0,09	0,28	0,04
Gas-KW-DT	0,02	0,56	0,01	0,23	0,03
Gas-KW-GT	0,03	4,69	0,06	1,97	0,46
Gas-KW-GuD	0,02	0,61	0,01	0,62	0,03
Öl-KW-DT	1,08	0,64	0,07	0,37	0,18
Müll-KW-DT	0,42	2,56	0,13	1,71	1,71
Wasserkraft groß	0,01	0,07	0,01	0,04	0,00
Windpark	0,01	0,04	0,01	0,07	0,00
PV-monokristallin	0,13	0,26	0,02	0,22	0,04
PV-multikristallin	0,09	0,18	0,02	0,19	0,03

Die Unterschiede in den Luftschadstoffemissionen der Teil-Kraftwerksparkre erklären sich aus den Anteilen fossiler Kraftwerke sowie den Brennstoffeigenschaften.

Die fossilen Kraftwerke liegen bei NO_x dicht bei einander (Ausnahme: GT-KW), bei SO₂ zeigen Gasanlagen brennstoffbedingt nur geringe Emissionen.

Die regenerativen Energien weisen demgegenüber sehr geringe Emissionen auf (überwiegend unter denen von AKW), wengleich monokristalline Solarzellen fast 1/3 der NO_x-Emissionen von Gas-GuD-Kraftwerken zeigen - hier ist wieder der Einfluß der Vorkette (Materialherstellung) zu sehen.

Treibhausgasemissionen im Szenario „Strom-einzeln“

[g/kWh]	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO ₂ -Äquiv.
Stromnetz-lokal-D	649	1,55	0,03	689
EI-KW-Park-D	629	1,50	0,02	668
EI-KW-Park-Ost	842	0,45	0,03	860
EI-KW-Park-West	601	1,63	0,02	643
AKW	34	0,04	0,00	35
BrK-KW-DT-rheinisch	1.141	0,04	0,03	1.152
BrK-KW-DT-Lausitz	1.024	0,04	0,03	1.034
BrK-KW-DT-Leipzig	901	0,03	0,03	910
StK-KW-DT-BRD-mix	907	4,63	0,05	1.019
StK-KW-DT-Import	881	2,29	0,04	942
Gas-KW-DT	492	1,36	0,01	524
Gas-KW-GT	633	1,81	0,03	680
Gas-KW-GuD	377	1,05	0,02	404
Öl-KW-DT	762	0,22	0,03	775
Müll-KW-DT	597	0,09	0,04	612
Wasserkraft groß	32	0,04	0,00	33
Windpark	19	0,04	0,00	20
PV-monokristallin	156	0,39	0,01	166
PV-multikristallin	101	0,26	0,00	108

CO₂-Äquivalente für 100 Jahre Integrationszeit, nur direkte Treibhauswirkung

Die Treibhausgasbilanz macht deutlich, daß nennenswerte Reduktionen gegenüber fossiler Stromerzeugung nur durch regenerative Energien erreicht werden können - AKW-Strom liegt noch über Wasserkraft und Windstrom.

Die Photovoltaik liegt aufgrund des Herstellungsaufwands und der CO₂-intensiven Prozesse (Lichtbogen !) vergleichsweise hoch - dies ließe sich durch neue Fertigungstechniken senken, die auch aus Kostengründen mittelfristig anzunehmen sind.

Feste Reststoffe im Szenario „Strom-einzeln“

[g/kWh]	Asche	REA-Reststo	Prod.abfall	Abraum
Stromnetz-lokal-D	10,3	11,2	17,5	2.405,8
EI-KW-Park-D	10,0	10,9	15,5	2.332,6
EI-KW-Park-Ost	11,7	26,6	0,4	8.063,1
EI-KW-Park-West	9,8	8,8	17,5	1.588,3
AKW	0,3	0,3	0,9	83,0
BrK-KW-DT-rheinisch	18,1	12,5	0,2	6.947,5
BrK-KW-DT-Lausitz	16,1	38,6	0,2	13.409,9
BrK-KW-DT-Leipzig	23,3	36,2	0,2	6.177,9
StK-KW-DT-BRD-mix	5,9	17,0	10,4	588,7
StK-KW-DT-Import	9,3	8,7	0,7	2.081,8
Gas-KW-DT	0,0	0,0	1,3	20,2
Gas-KW-GT	0,1	0,1	1,6	24,8
Gas-KW-GuD	0,0	0,0	0,7	11,3
Öl-KW-DT	0,2	19,5	1,2	42,9
Müll-KW-DT	116,0	-	-	-
Wasserkraft groß	0,1	0,1	0,7	45,3
Windpark	0,0	0,0	1,1	24,9
PV-monokristallin	2,2	2,4	37,4	588,5
PV-multikristallin	1,4	1,5	36,0	385,8

Die Reststoffbilanz weist erwartungsgemäß die hohen Mengen der kohlebetriebenen Systeme aus, der Spitzenreiter bei Asche ist jedoch die Müllverbrennung.

Bei den Regenerativen zeigen Solarzellen wieder die hohe Vorbelastung aus der stromintensiven Materialherstellung und die vergleichsweise hohen Produktionsabfallmengen. Hier ist insgesamt zu berücksichtigen, daß keine Annahmen zum stofflichen Recycling getroffen wurden: sowohl bei den Kohlesystemen wie auch bei PV-Anlagen ist dies durchaus möglich und erreicht teilweise beachtliche Verwertungsquoten.

Ressourcenbedarfe im Szenario „Strom-einzeln“

Ressourcenbilanz	Primärenergie [kWh/kWh]	[Rohstoffe g/kWh]			Fläche [cm²/kWh]
		Erze	Mineralien	Wasser	
Stromnetz-lokal-D	2,937	7,3	22,2	4.012	2,731
EI-KW-Park-D	2,849	2,6	18,5	3.887	0,086
EI-KW-Park-Ost	2,428	2,1	34,7	11.067	0,121
EI-KW-Park-West	2,904	2,7	16,4	2.955	0,081
AKW	3,159	1,6	9,1	2.296	0,069
BrK-KW-DT-rheinisch	2,737	1,0	11,4	6.959	0,171
BrK-KW-DT-Lausitz	2,490	1,0	43,1	8.123	0,160
BrK-KW-DT-Leipzig	2,435	1,0	41,2	7.965	0,156
StK-KW-DT-BRD-mix	2,718	3,0	18,3	2.913	0,034
StK-KW-DT-Import	2,581	4,0	13,1	1.920	0,052
Gas-KW-DT	2,501	6,8	16,2	1.807	0,030
Gas-KW-GT	3,220	8,6	19,3	71	0,046
Gas-KW-GuD	1,926	3,6	8,0	718	0,024
Öl-KW-DT	2,723	4,1	22,9	1.791	0,073
Müll-KW-DT	8,000	0,0	0,0	0	0,095
Wasserkraft groß	1,049	3,0	59,2	63	0,018
Windpark	1,044	5,6	28,8	52	0,506
PV-monokristallin	1,713	100,6	15,7	1.310	1,590
PV-multikristallin	1,465	100,3	13,0	952	1,512

Bei den Ressourcenbedarfen liegen die konventionellen Kraftwerke recht eng bei einander, die PV-Anlagen benötigen unter den Regenerativen aufgrund des geringen Nutzungsgrades vergleichsweise viel Primärenergie.

Der hohe Wasserbedarf des ostdeutschen Kraftwerksparks ist braunkohlebedingt und enthält auch Altanlagen mit schlechterem Nutzungsgrad.

Beim Flächenbedarf liegen Wind- und Solarenergie erheblich über konventionellen Anlagen, wobei allerdings die Werte relativiert werden müssen: beim Wind überwiegen Schutzflächen und bei PV-Systemen kann durch die Nutzung vorhandener Flächen der Bedarf gesenkt werden.

4.3 Vergleiche von Systemen zur Wärmebereitstellung

Ähnlich wie beim Strom wurde auch für Heizsysteme aus der Vielzahl möglicher Prozesse eine Auswahl für das Szenario „Wärme“ getroffen, die jeweils 1 kWh Nutzwärme bereitstellen. In der 1. Option des Szenarios wird eine konventionelle Ölheizung als Referenzsystem gewählt. Die 2. Option verwendet als Wärmelieferant die Gas-Heizung, die als konkurrierendes System ebenfalls mit einem atmosphärischen Brenner betrieben wird. In der 3. Option liefert ein Flüssiggas-Heizkessel die Nutzwärme. Als 4. Option wird eine Elektroheizung vorgesehen, die Strom aus neuen Kohlekraftwerken bezieht, während in Option 5 eine Elektroheizung mit Strommix (Steinkohle + 15% AKW-Anteil !) die Wärme bereitstellt.

Eine bivalente Elektro-Wärmepumpe (WP) WP in Kombination mit Öl-Heizung ist Option 6 und eine monovalente Elektro-WP ist Option 7.

Die Optionen 8-10 bieten Nah- und Fernwärme in Kraft-Wärme-Kopplung auf Basis verschiedener Einsatzbrennstoffe und Technologien an¹⁴. Dabei wurden die Systeme *wärmeseitig netto* unter Verrechnung eines Bonus für den parallel zur Wärme erzeugten Koppelstrom betrachtet.

GEMIS geht bei der wärmeseitigen *Netto*-Betrachtung in zwei Schritten vor:

- * Zuerst wird das KWK-System als rein thermischer Prozeß betrachtet, d.h. zur Bestimmung des Brennstoffaufwands (und der damit verbundenen Emissionen) wird wie bei einem Heizsystem die gelieferte Nutzwärme durch den *thermischen* Nutzungsgrad dividiert. Hierin ist jedoch der Brennstoffanteil (rsp. Emissionen) für den parallel erzeugten KWK-Strom enthalten - ein KWK-Prozeß stellt neben Wärme ja auch Strom bereit.
- * Im 2. Schritt wird dieser die Bilanz "störende" KWK-Strom herausgerechnet. Dazu wird betrachtet, welcher Strombereitstellungsprozeß durch den KWK-Strom *ersetzt* und welche Brennstoffmenge (rsp. Emissionen) dadurch *erspart* werden können. Diese Menge wird dann von den vorher bestimmten Brennstoff- und Emissionsmengen des KWK-Systems *abgezogen*, sodaß die Brennstoff- und Emissionsmenge übrigbleibt, die der reinen *Wärmebereitstellung* aus dem KWK-System anzurechnen ist.

Somit wird je nachdem, wieviel Strom ein KWK-System pro Nutzwärmeeinheit erzeugt, mehr oder weniger viel gutgeschrieben.

Da in die Gutschrift Nutzungsgrad und Emissionen des substituierten Prozesses eingehen, ist dessen Auswahl für die Nettobilanz wichtig.

GEMIS kann Varianten zur Gutschrift berechnen¹⁵.

Die in den Optionen 8-13 repräsentierten KWK-Systeme wurden wegen ihrer verschiedenen Einsatzbedingungen, Stromkennzahl, Brennstoff und Emissionsminderungstechnik ausgewählt.

Für alle wurde ein neues Steinkohlekraftwerk (mit Entschwefelung und Entstickung) zur Bestimmung der Gutschrift für den KWK-Strom herangezogen.

In Optionen 8-10 wird die Nutzwärme aus *Nahwärmenetzen* bereitgestellt, die ihrerseits Wärme aus Gasmotor-BHKW sowie Gas-Spitzenkesseln beziehen (70% der Wärme BHKW, 30% Kessel). In Option 10 wird eine 1-2-FH-Siedlung versorgt, in Option 11 ein Wohngebiet mit MFH und in Option 12 eine Mischstruktur aus MFH und Reihenhäusern.

Diesen dezentralen Systemen steht ein *Fernwärmenetz* gegenüber, das Wärme aus einem Steinkohle-HKW mit Entnahme-Kondensation und Öl-Spitzenkessel (Option 11) liefert. Die Fernwärme wird zu 85% im HKW und zu 15% in Spitzenkesseln erzeugt.

¹⁴ Dabei werden allen Systemen die Wärmeverteilverluste sowie der Pumpstromaufwand angerechnet und die Anteile von Spitzenkesseln einbezogen (Heizöl bei Kohle, Diesel und Biomasse bzw. Erdgas bei den Gas-Systemen).

¹⁵ Anstelle der Gutschrift auf Basis eines neuen Steinkohle-Mittellast-Kraftwerkes können die NutzerInnen auch andere Stromerzeuger oder auch ein Strommix definieren (z.B. Gas-GuD-Kraftwerke, mittleres Strommix usw.). Zu Szenarien ohne Gutschriften siehe Abschnitt 4.4.

In den verbleibenden Optionen werden regenerative Energiesysteme mit *Biomasse* für die Wärmebereitstellung genutzt. Option 12 verwendet ein BHKW, das mit Biogas aus der Fermentation von Gülle betrieben wird (Biogas). Option 13 unterstellt den Einsatz von Rapsöl in einem Dieselmotor-BHKW.

Die Optionen 14-17 setzen auf Biomasse zur Nur-Wärmeerzeugung. In Option 14 ist es eine Zentralheizung für Holz-Hackschnitzel sowie Option 15 die Kombination einer Stückholzheizung mit einer Solaranlage, die 20% der Jahreswärme liefert.

In Option 16 sollen Strohcoals aus Reststroh in einem Heizwerk zur Nahwärmebereitstellung verwendet werden.

In Option 17 wird schließlich zur Abrundung des Einsatzes von Biomasse Heizwerke auf Basis von Nachwachsenden Rohstoffen (NR) - hier Chinaschilf (*miscanthus*) angenommen:

In Option 18 wird ein „NegaWatt“-Prozeß mit einer Ölheizung kombiniert: jede Szenario-Option kann aus beliebig vielen einzelnen Prozessen bestehen, die sich frei kombinieren lassen. Hier wird Wärmedämmung mit einer Ölheizung kombiniert, um 1 kWh Nutzwärme bereitzustellen. Die Wärmedämmung kann 50% der Wärmenachfrage durch „Einsparenergie“ decken, sodaß die Ölheizung noch 0,5 kWh liefern muß.

Die folgenden Tabellen zeigen die Ergebnisse des Szenarios „Wärme“.

Luftschadstoffemissionen im Szenario „Wärme“

[g/kWh]	SO ₂	NO _x	Staub	CO	NM VOC
1 Heizöl	0,47	0,30	0,02	0,25	0,10
2 Erdgas	0,02	0,22	0,01	0,23	0,03
3 Flüssiggas	0,13	0,30	0,02	0,23	0,10
4 Elektro-max	0,71	0,59	0,04	0,26	0,04
5 Elektro-mix	0,66	0,55	0,04	0,25	0,04
6 Elektro-WP-bivalent	0,39	0,29	0,02	0,20	0,06
7 Elektro-WP-mono	0,25	0,22	0,02	0,12	0,02
8 Nahwärme-EFH	-0,37	0,22	0,00	0,30	0,02
9 Nahwärme-MFH	-0,41	0,18	0,00	0,29	0,02
10 Nahwärme-Mix	-0,41	0,17	0,00	0,28	0,01
11 Fernwärme-Kohle	0,14	0,01	0,01	0,04	0,01
12 Biogas-BHKW-klein	-0,21	1,36	0,15	1,21	0,26
13 Rapsöl-BHKW-klein	-0,04	5,08	0,36	0,78	0,01
14 Holzhackschnitzel	0,27	0,67	0,52	1,58	0,91
15 Solarkollektor+Holzheiz	0,28	0,49	1,24	6,76	2,69
16 Stroh-Heizwerk	0,63	0,38	0,17	0,86	0,09
17 Chinagrass-Heizwerk	0,09	0,34	0,04	0,43	0,02
18 Öl+Dämmung	0,27	0,18	0,02	1,26	0,06

Die Ergebnisse des Heizungsvergleichs zeigen bei den Luftschadstoffen, daß die Elektro-wärme-Systeme bei SO₂ und NO_x **deutlich über** den meisten anderen Anlagen liegen, gefolgt vom Strohheizwerk und den holzbefeuerten Prozessen.

Die Erdgasheizungen sind bei allen Schadstoffen im unteren Bereich, nur die Nah- und Fern-wärme ist günstiger. Bei Staub, CO und NMVOC sind die holz- und strohspezifischen hohen Werte bedingt durch die ungünstigen Verbrennungsbedingungen und können nur durch Weiterentwicklung der Anlagentechnik oder gezieltes Nutzerverhalten gesenkt werden.

Treibhausgasemissionen im Szenario „Wärme“

[g/kWh]	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO ₂ -Äquiv.
1 Heizöl	351,7	0,1	0,0	356
2 Erdgas	251,0	1,3	0,0	280
3 Flüssiggas	305,0	0,1	0,0	309
4 Elektro-max	927,3	4,7	0,0	1.041
5 Elektro-mix	836,3	4,2	0,0	938
6 Elektro-WP-bivalent	377,7	1,1	0,0	404
7 Elektro-WP-mono	322,5	1,6	0,0	361
8 Nahwärme-EFH	- 83,3	- 0,5	- 0,0	- 97
9 Nahwärme-MFH	- 140,0	- 0,7	- 0,0	- 160
10 Nahwärme-Mix	- 147,3	- 0,8	- 0,0	- 169
11 Fernwärme-Kohle	161,7	0,5	0,0	175
12 Biogas-BHKW-klein	- 366,8	- 2,1	0,0	- 411
13 Rapsöl-BHKW-klein	- 412,4	- 2,6	1,3	- 63
14 Holzhackschnitzel	40,0	0,5	0,0	65
15 Solarkollektor+Holzheiz	15,3	1,8	0,1	83
16 Stroh-Heizwerk	14,7	0,1	0,0	27
17 Chinagrass-Heizwerk	14,9	0,0	0,1	43
18 Öl+Dämmung	193,1	0,2	0,0	197

CO₂-Äquivalente für 100 Jahre Integrationszeit, nur direkte Treibhauswirkung

Bei den Treibhausgasen liegen wiederum die Elektroheizsysteme am ungünstigsten, auch Elektrowärmepumpen sind kaum günstiger als Öl- oder Gasheizungen.

Demgegenüber erlauben die Nah- und Fernwärmesysteme erhebliche Einsparungen gegenüber Öl **und** Erdgas - mit z.T. negativen Gesamtemissionen durch den angerechneten Strombonus (zum Brutto-Vergleich ohne Stromgutschrift siehe Abschnitt 4.4).

Die Biomasse-Systeme zeigen erwartungsgemäß ebenfalls geringe THG-Emissionen, auch wenn die N₂O-Emissionen beim Anbau von Nachwachsenden Rohstoffen in die CO₂-Äquivalente einbezogen werden.

Feste Reststoffe im Szenario „Wärme“

[g/kWh]	Asche	REA-Restoff	Prod.abfall	Abraum
1 Heizöl	0,1	0,1	1,1	36
2 Erdgas	0,1	0,1	0,9	32
3 Flüssiggas	0,1	0,1	0,7	34
4 Elektro-max	6,1	17,3	11,2	625
5 Elektro-mix	5,5	15,6	10,2	576
6 Elektro-WP-bivalent	1,4	3,8	3,3	171
7 Elektro-WP-mono	2,2	6,0	4,5	263
8 Nahwärme-EFH	-3,1	-9,4	-4,7	-255
9 Nahwärme-MFH	-3,5	-10,4	-5,5	-311
10 Nahwärme-Mix	-3,4	-10,3	-5,4	-300
11 Fernwärme-Kohle	-2,2	2,0	1,4	109
12 Biogas-BHKW-klein	-1,5	-8,5	96,0	-285
13 Rapsöl-BHKW-klein	-2,8	-10,5	510,4	-224
14 Holzhackschnitzel	0,4	0,4	1,2	87
15 Solarkollektor+Holzheiz	0,2	0,2	6,5	47
16 Stroh-Heizwerk	13,1	0,2	0,4	48
17 Chinagrass-Heizwerk	0,7	0,1	0,1	12
18 Öl+Dämmung	0,2	0,2	2,1	41

Bei den festen Reststoffen liegen wiederum die strombetriebenen Heizsysteme am höchsten, während alle anderen (außer Stroh) um ca. Eine Größenordnung darunter abschneiden.

Die Nahwärmesysteme mit KWK erzielen durch den Strombonus sogar negative Reststoffemissionen

Ressourcenbedarfe im Szenario „Wärme“

Ressourcenbilanz	Primärenergie [kWh/kWh]	Rohstoffe [g/kWh]			Fläche [cm ² /kWh]
		Erze	Mineralien	Wasser	
1 Heizöl	1,317	0,0	0,1	1,9	0,056
2 Erdgas	1,288	0,0	0,1	5,3	0,039
3 Flüssiggas	1,312	0,0	0,1	1,4	0,055
4 Elektro-max	2,785	0,0	0,2	25,1	0,063
5 Elektro-mix	3,000	0,0	0,2	24,7	0,071
6 Elektro-WP-bivalent	1,278	0,0	0,2	5,8	0,063
7 Elektro-WP-mono	1,001	0,0	0,2	7,9	0,081
8 Nahwärme-EFH	0,673	0,0	0,1	0,3	0,399
9 Nahwärme-MFH	0,488	0,0	0,1	-2,0	0,142
10 Nahwärme-Mix	0,448	0,0	0,1	-2,1	0,148
11 Fernwärme-Kohle	0,543	0,0	0,0	2,4	0,211
12 Biogas-BHKW-klein	9,281	0,0	0,1	-3,6	-0,009
13 Rapsöl-BHKW-klein	0,819	0,0	0,0	149,0	1,104
14 Holzhackschnitzel	1,429	0,0	0,1	1,6	0,122
15 Solarkollektor+Holzheiz	1,498	0,0	0,0	1,3	0,668
16 Stroh-Heizwerk	1,242	0,0	0,0	0,5	0,060
17 Chinagrass-Heizwerk	1,240	0,0	0,0	0,2	13,481
18 Öl+Dämmung	0,727	0,0	0,6	24,9	0,043

Die den Heizungsvergleich abschließende Betrachtung der Ressourcenbedarfe ergibt wiederum die vergleichsweise hohen Primärenergiebedarfe der strombetriebenen Anlagen, die nur durch das Biogas-BHKW übertroffen werden - dieses benutzt jedoch die erneuerbare Ressource Biomasse (Gülle).

Die KWK-Systeme sowie der NegaWatt-Prozeß (mit Wärmedämmung) erlauben demgegenüber geringe Primärenergiebedarfe - sie liegen unter 1 kWh je kWh Nutzwärme.

Beim Bedarf an Erzen fällt der hohe Bedarf der Holzheizung in Kombination mit dem Solarkollektor auf - hier ist die Vorleistung für den Kollektor Ursache, die aufgrund der geringen Energiedichte „durchschlägt“.

Die hohen Bedarfe des Rapsöl-BHKW und des NegaWatt-Prozesses sowie der Elektroheizungen an Mineralien beruhen ebenfalls auf den spezifischen Materialvorleistungen (Dünger beim Rapsöl, Dämmung bei NegaWatt und geringe Nutzungsgrade bei den Speicherheizungen, die mit dem Speicherkern auch massive Materialvorleistungen erfordern).

Der Wasserbedarf der Heizsysteme zeigt wiederum die hohen Ansprüche der strombetriebenen Systeme und den Effekt der Berücksichtigung des Anbaus bei nachwachsenden Rohstoffen (Rapsöl, Chinagrass). Die anderen Heizanlagen liegen hier um rund eine Größenordnung niedriger, wobei die KWK-Systeme sogar durch den Strombonus negative Werte zeigen, also die Wasserbilanz verbessern.

Der Flächenbedarf verdeutlicht wiederum die Rolle des Anbaus bei den nachwachsenden Rohstoffen (Rapsöl, Chinagrass), wobei das Rapsöl-BHKW dies durch die Stromgutschrift weitestgehend kompensieren kann. Der Flächenbedarf der anderen Heizanlagen liegt in einem vergleichsweise engen Band - jedoch ist zu bedenken, daß bei typischen Heizwärmebedarfen von rund 20 MWh/a entsprechende Flächen in Anspruch genommen werden.

Der Heizsystemvergleich mit GEMIS zeigt insgesamt, daß die strombetriebenen Systeme bei praktisch allen betrachteten Umweltaspekten erheblich über den anderen Prozessen liegen, während die erneuerbaren Energien vor allem bei den Treibhausgasen drastische Verbesserungen gegenüber Öl und Gas bringen.

Die KWK-Anlagen weisen durch den Strombonus ganz überwiegend Entlastungen auf, insbesondere beim Betrieb mit Erdgas und Biomasse.

Die NegaWatt-Option schneidet ebenfalls sehr positiv ab - hier spielen die Materialvorleistungen für die Wärmedämmung somit keine entscheidende Rolle.

Da um die Rolle dieser Gutschriften oft gestritten wird, soll der Vergleich von KWK-Systemen mit der getrennten Erzeugung von Strom und Wärme im folgenden nochmals näher untersucht werden.

4.4 Vergleiche von Systemen mit Kraft-Wärme-Kopplung

Bei den Szenarien für Strom bzw. für Wärme wurde jeweils *eine* Nutzenergieform nachgefragt, sodaß bei KWK-Prozessen eine Gutschrift für das jeweilige Koppelprodukt erfolgte. Dies ist zwar eine logisch konsistente und bequeme Methodik, führt aber je nach dem Blickwinkel "Wärme" oder "Strom" zu verschiedenen Resultaten. Daher soll gezeigt werden, wie mit GEMIS auch Szenarien für *kombinierte* Nachfragen berechnet werden können, bei denen auf eine **Gutschrift verzichtet werden kann**.

In GEMIS-Szenarien können **gleichzeitig** beliebig viele Einzelprozesse verknüpft werden, die verschiedene Outputs bereitstellen - Wärme, Strom, Güter- oder Personentransport sowie Materialien. Um die Problematik von Gutschriften für Wärme oder Strom bei KWK-Prozessen zu umgehen, kann daher in *einem* Szenario sowohl Wärme wie auch Strom nachgefragt werden. KWK-Anlagen, die z.B. Strom erzeugen, erhalten dann nach der GEMIS-Methodik zur *Brutto*-Bilanzierung *keine* Gutschrift für die parallel bereitgestellt Wärme, sondern dies wird in der Szenariodefinition der Vergleichsprozesse berücksichtigt.

Um dieses Prinzip zu verdeutlichen, wurden ausgewählte Stromprozesse - ein AKW sowie ein Kohle-Heizkraftwerk, ein Gas-GuD-Heizkraftwerk, ein Gas-BHKW und ein Biogas-BHKW - im Szenario „Strom-KWK-brutto“ nach der **Brutto**-Methode verglichen.

Während die HKW und BHKW Strom **und** Wärme liefern, stellt das AKW als reines Kondensationskraftwerk keine KWK-Wärme bereit. Daher muß die fehlende Wärmemenge aus einem zusätzlichen Heizsystem bereitgestellt werden.

Als Referenzoption wird im Szenario „KWK-brutto“ Strom in einem AKW (1 kWh) sowie Wärme aus einer Ölheizung (2 kWh) bereitgestellt.

In Option 2 erzeugt ein großes Steinkohle-HKW parallel zu 1 kWh Strom auch 1,67 kWh Wärme. Zum Vergleich mit der Referenzoption muß hier noch 0,33 kWh Wärme aus einer Ölheizung zusätzlich bereitgestellt werden.

Das Erdgas-GuD-HKW in Option 3 stellt parallel zu 1 kWh Strom nur 1 kWh Wärme bereit, sodaß eine weitere kWh Wärme durch eine Ölheizung erzeugt werden muß¹⁶.

Das Erdgas- und das Biogas-BHKW (Optionen 4 und 5) geben dagegen bei der Erzeugung von 1 kWh Strom gleichzeitig auch 2 kWh Wärme ab, es ist somit keine zusätzliche Wärme aus Ölheizungen für den Vergleich mit den anderen Optionen nötig.

Die Resultate dieses „Brutto“-Szenarios zeigen die folgenden Tabellen.

Luftschadstoffemissionen des „KWK-Brutto“-Szenarios

[g je 1 kWh-el + 2 kWh-til]	SO ₂	NO _x	Staub	CO	NMVOG
AKW + Öl-Hzg	1,063	0,751	0,071	0,559	0,202
Ko-HKW	1,014	0,604	0,055	0,344	0,062
GuD-HKW + Öl-Hzg	0,493	1,048	0,034	1,002	0,136
Gas-BHKW+ Öl-Hzg	0,029	0,888	0,032	0,746	0,064
Biogas-BHKW + Öl-Hzg	0,243	3,48	0,36	3,516	0,439

Dieses Ergebnis zeigt für die Luftschadstoffe, daß gegenüber der Kombination „Atomstrom + Ölheizung“ alle HKW Entlastungen bei SO₂, z.T. Staub und NVOC erlauben, während sie bei NO_x und CO z.T. leicht höher liegen.

Das Kohle-HKW liegt bei allen Luftschadstoffen ebenfalls günstiger als das Mix „AKW+Öl“.

Treibhausgasemissionen des „KWK-Brutto“-Szenarios

[g je 1 kWh-el + 2 kWh-til]	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO ₂ -Äquiv.
AKW + Öl-Hzg	737	0,3	0,011	747
Ko-HKW	1.226	5,705	0,059	1.364
GuD-HKW + Öl-Hzg	812	1,413	0,026	850
Gas-BHKW+ Öl-Hzg	707	3,652	0,02	790
Biogas-BHKW + Öl-Hzg	11	0,548	0,087	50

CO₂-Äquivalente für 100 Jahre Integrationszeit, nur direkte Treibhauswirkung

Bei den Treibhausgasen ergeben sich für CO₂ klare Vorteile für die BHKW, während das GuD-HKW leicht über der Option „AKW+Öl“ liegt. Bei den CO₂-Äquivalenten schneidet das Biogas-BHKW am besten ab.

Das Kohle-HKW liegt brennstoffbedingt bei den Treibhausgasen rund doppelt so hoch wie die anderen fossilen und die nukleare Option. Hier würde nur eine Kombination mit Biomasse zu einer nennenswerten Einsparung führen (Ko-Verbrennung z.B. von Holz).

Die Brutto-Bilanz bestätigt somit das Ergebnis der „Netto“-Bilanzierung, nach der Erdgas- und Biogas-BHKW weniger CO₂ emittieren als AKW + Ölheizungen.

¹⁶ Es können auch andere Wärmebereitstellungssysteme zur Deckung der Wärmenachfrage gewählt werden, z.B. eine Gasheizung.

Feste Reststoffe des „KWK-Brutto“-Szenarios

[g je 1 kWh-el + 2 kWh-th]	Asche	REA-Reststo	Prod.abfall	Abraum
AKW + Öl-Hzg	0,6	0,6	3,1	154,3
Ko-HKW	1,9	20,9	12,9	731,1
GuD-HKW + Öl-Hzg	0,2	0,2	1,9	49,0
Gas-BHKW+ Öl-Hzg	0,1	0,1	1,2	20,3
Biogas-BHKW + Öl-Hzg	3,7	0,0	289,6	15,7

Bei den festen Reststoffen liegen wiederum die Erdgassysteme deutlich unter den anderen, während die Kohle brennstoffbedingt hohe Werte aufweist.

Das Bio-BHKW weist bei den Produktionsabfällen die höchsten Werte auf - diese Reststoffe stammen aus der Vergärung und können aber vergleichsweise problemlos kompostiert werden.

Ressourcenbilanz des „KWK-Brutto“-Szenarios

Ressourcenbilanz	Primärenerg	Rohstoffe [g je 1 kWh Strom + 2 kWh Wärme]			
	[kWh]	Erze	Mineralien	Wasser	Fläche
AKW + Öl-Hzg	5,8	10,2	12,9	2491,2	0,180
Ko-HKW	3,8	4,0	21,9	1326,7	0,045
GuD-HKW + Öl-Hzg	3,7	8,5	11,2	135,8	0,084
Gas-BHKW+ Öl-Hzg	3,6	6,2	15,3	57,0	0,035
Biogas-BHKW + Öl-Hzg	29,7	3,8	18,2	33,3	0,005

Auch die abschließende Bilanz des Ressourcenbedarfs bestätigt die Ergebnisse der „Netto“-Betrachtungen von KWK-Systemen:

Ihr Primärenergieaufwand liegt günstig, während beim Biogas-BHKW der hohe Bedarf auf der energetisch ungünstigen Vergärung beruht - aber die genutzte Primärenergie ist erneuerbar (und außerdem ein Reststoff).

Der Erzbedarf der Kombination „AKW+Öl“ liegt im Vergleich am höchsten, auch beim Wasserbedarf und der Flächeninanspruchnahme ist diese Option „Spitze“. Demgegenüber können KWK-Systeme (auch mit Kohle) Einsparungen realisieren.

Die „Brutto“-Bilanz der KWK-Systeme zeigt insgesamt, daß auch ohne Anrechnung einer Gutschrift die KWK-Anlagen umweltmäßig günstige Optionen darstellen.

4.5 Vergleiche von Transportsystemen

Um die Möglichkeiten zur Analyse von Transportsystemen im Bereich Personenverkehr zu demonstrieren, wurde ein Szenario aufgestellt, in dem konventionelle Pkw mit Benzin und Diesel sowie Elektro-Pkw und Fahrzeuge mit "Biosprit" (Rapsöl, Bioäthanol) sowie verbesserte Fahrzeuge verglichen werden.

Im Szenario erbringen alle Verkehrsprozesse eine Dienstleistung von **1.000 Personen-Kilometer** (P*km).

Die Bezeichnung IST bedeutet bei den Optionen, daß heutige Fahrzeuge aus dem Bestand betrachtet wurden.

Das Kürzel "City" verweist auf den Betrieb im innerstädtischen Zyklus, während „AB“ für den Fahrzeugbetrieb auf Autobahnen steht.

Das Kürzel "neu" bedeutet, daß ein verbessertes Neufahrzeug unterstellt wird (EURO-3-Norm, sparsamere Antriebstechnik).

Bei den Fahrzeugen mit Rapsöl und Bioäthanol wurde in der vorgelagerten Treibstoff-Prozeßkette *keine Gutschrift* für Koppelprodukte (z.B. Sojaschrot) angenommen.

Luftschadstoffemissionen des Szenarios „Verkehr“

[kg/1000 P*km]	SO ₂	NO _x	Staub	CO	NMVOC
Benzin-Pkw IST	0,183	1,654	0,027	5,586	0,543
Benzin-Pkw EURO2 City	0,183	0,808	0,027	1,857	0,456
Benzin-Pkw EURO2 Autobahn	0,157	0,333	0,025	0,610	0,380
Benzin-Pkw-neu	0,142	0,489	0,023	1,824	0,808
Diesel-Pkw- IST	0,144	0,835	0,114	0,704	0,149
Diesel-Pkw City	0,120	0,573	0,089	0,700	0,107
Diesel-Pkw Autobahn	0,164	0,755	0,147	0,592	0,101
Diesel-Pkw-neu	0,116	0,670	0,092	0,567	0,120
Elektro-Pkw-Strommix	0,219	0,867	0,028	1,887	0,060
Elektro-Pkw-Kohlestrom	0,234	0,877	0,028	1,891	0,061
Bioäthanol-Pkw	0,142	1,198	0,046	1,916	0,073
Rapsöl-Pkw	0,131	6,304	0,191	1,203	0,172
Bus-Diesel IST City	0,061	1,231	0,058	0,641	0,154
Bahn	0,037	0,067	0,005	0,061	0,007
Flugzeug-Inland	0,898	1,515	0,012	0,344	0,131
Flugzeug-Ausland	0,598	0,847	0,008	0,175	0,095

Die Bilanz der Luftschadstoffe zeigt, daß bei SO₂ nur geringe Unterschiede bestehen - es tritt allerdings auch bei Elektrofahrzeugen keine Minderung gegenüber Diesel und Benzin auf. Bei NO_x erreichen neue (verbesserte) Benzin- und Diesel-Pkw ebenfalls geringere Werte als Elektrofahrzeuge.

Demgegenüber liegt der Rapsöl-Pkw hier erheblich über den anderen Fahrzeugen.

Selbst bei Staub und CO ist die Bilanz der Elektrofahrzeuge gegenüber konventionellen Pkw nicht besser - nur bei den NMVOC erzielen sie einen Vorteil (durch den Wegfall der Verdampfungsverluste).

Am günstigsten liegen erwartungsgemäß die öffentlichen Verkehrsmittel Bus und Bahn, während die Flugzeuge deutlich ungünstiger sind.

Treibhausgasemissionen des Szenarios „Verkehr“

[kg/1000 P*km]	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO ₂ -Äquiv.
Benzin-Pkw IST	255,1	0,2	0,1	274,4
Benzin-Pkw EURO2 City	255,1	0,2	0,1	274,1
Benzin-Pkw EURO2 Autobahn	215,0	0,1	0,1	233,7
Benzin-Pkw-neu	194,1	0,1	0,0	200,3
Diesel-Pkw- IST	208,8	0,1	0,0	213,7
Diesel-Pkw City	150,8	0,1	0,0	156,4
Diesel-Pkw Autobahn	217,6	0,1	0,0	223,5
Diesel-Pkw-neu	167,6	0,1	0,0	170,3
Elektro-Pkw-Strommix	246,8	1,2	0,1	292,2
Elektro-Pkw-Kohlestrom	271,8	1,4	0,1	320,4
Bioäthanol-Pkw	110,6	0,1	0,2	171,7
Rapsöl-Pkw	57,0	0,2	0,4	183,7
Bus-Diesel IST City	87,2	0,0	0,0	89,9
Bahn	44,5	0,2	0,0	48,8
Flugzeug-Inland	275,1	0,1	0,0	276,7
Flugzeug-Ausland	183,1	0,0	0,0	184,0

CO₂-Äquivalente für 100 Jahre Integrationszeit, nur direkte Treibhauswirkung

Bei den Treibhausgasemissionen sind, bezogen auf CO₂, die Unterschiede der Fahrzeuge vergleichsweise gering. Gegenüber neuen Benzin- und Diesel-Pkw bringen Elektrofahrzeuge keine Entlastung, auch wenn Strom aus dem Kraftwerksmix angenommen wird.

Die Biomasse-Fahrzeuge sowie der öffentliche Verkehr liegen dagegen deutlich unter den CO₂-Emissionen konventioneller Pkw - jedoch ergibt sich bei Einrechnung der anderen Treibhausgase für die Rapsöl- und Bioäthanol-Pkw **kein Vorteil** gegenüber neuen Diesel-Pkw.

Der drastische Unterschied bei den THG-Emissionen von Bahn und Inlands-Flugzeug belegt, daß hier erhebliche Entlastungen durch Verlagerung möglich sind - selbst wenn die Bahn auf Fernstrecken geringere Auslastungen hinnehmen müßte.

Bei Auslandsflügen ist der Unterschied geringer - hier liegt das Flugzeug im Bereich der Pkw.

Feste Reststoffe des Szenarios „Verkehr“

[kg/1000 P*km]	Asche	REA-Reststo	Prod.abfall	Abraum
Benzin-Pkw IST	0,1	0,1	3,6	35,4
Benzin-Pkw EURO2 City	0,1	0,1	3,6	35,4
Benzin-Pkw EURO2 Autobahn	0,1	0,1	3,6	32,2
Benzin-Pkw-neu	0,1	0,1	3,2	28,9
Diesel-Pkw- IST	0,0	0,0	1,4	11,2
Diesel-Pkw City	0,0	0,0	3,9	21,3
Diesel-Pkw Autobahn	0,0	0,0	3,9	23,0
Diesel-Pkw-neu	0,0	0,0	1,2	9,3
Elektro-Pkw-Strommix	1,5	4,3	34,7	221,0
Elektro-Pkw-Kohlestrom	1,7	4,7	34,9	234,6
Bioäthanol-Pkw	0,1	0,1	3,6	32,9
Rapsöl-Pkw	0,3	0,2	151,5	51,4
Bus-Diesel IST City	0,0	0,0	0,8	5,2
Bahn	0,3	0,7	1,0	45,1
Flugzeug-Inland	0,0	0,0	0,2	7,0
Flugzeug-Ausland	0,0	0,0	0,1	4,6

Bei den festen Reststoffen zeigt sich wiederum die höheren Belastungen durch Elektrofahrzeuge - sie liegen um Größenordnungen über den anderen Optionen.

Ressourcenbedarfe des Szenarios „Verkehr“

Ressourcenbilanz	Primärenergie	[Rohstoffe kg/1000 P*km]		
	MJ/1000 P*km	Erze	Mineralien	Wasser
Benzin-Pkw IST	3.549	19,3	5,6	133,9
Benzin-Pkw EURO2 City	3.549	19,3	5,6	133,9
Benzin-Pkw EURO2 Autobahn	3.005	19,3	5,5	128,1
Benzin-Pkw-neu	2.723	17,0	4,9	114,1
Diesel-Pkw- IST	2.827	7,4	2,2	47,8
Diesel-Pkw City	2.104	21,3	5,8	117,4
Diesel-Pkw Autobahn	3.000	21,4	5,9	121,0
Diesel-Pkw-neu	2.275	6,2	1,9	40,0
Elektro-Pkw-Strommix	3.280	100,4	10,1	1027,0
Elektro-Pkw-Kohlestrom	3.067	100,4	10,3	1011,4
Bioäthanol-Pkw	4.070	19,3	6,4	913,1
Rapsöl-Pkw	2.810	7,4	47,6	3208,6
Bus-Diesel IST City	1.170	4,0	1,2	24,1
Bahn	707	3,2	2,6	174,3
Flugzeug-Inland	3.675	0,4	0,5	14,9
Flugzeug-Ausland	2.446	0,3	0,3	9,9

Die Ressourcenbilanz zeigt die hohen Primärenergie- und Rohstoffbedarfe der Elektro-Pkw auf. Der hohe Wert beim Bioäthanol-Fahrzeug ergibt sich aus der vergleichsweise schlechten Energieausnutzung in der Vorkette, allerdings wird hier eine erneuerbare Ressource genutzt. Auffallend sind schließlich die günstigen Werte bei den öffentlichen Verkehrsmitteln sowie die eher überraschend geringen Rohstoffbedarfe bei den Flugzeugen¹⁷.

Das Verkehrsszenario belegt, daß Elektro-Pkw keine umweltfreundliche Alternative zu fossilen Antrieben sind und auch Biomasse-Pkw kaum Entlastungen bei Treibhausgasen bringen. Demgegenüber sind energetisch verbesserte Neufahrzeuge wichtige Optionen zur Reduktion der Umweltbelastungen. Noch wichtiger und wirksamer ist die Nutzung der öffentlichen Verkehrsmittel Bus und Bahn - und „Nega-Kilometer“ durch Verkehrsvermeidung, die hier nicht betrachtet wurde.

¹⁷ Dabei ist jedoch zu beachten, daß die Verkehrsinfrastruktur (z.B. Flughäfen, Straßen, Schienen) nicht mit in der Bilanz enthalten ist.

5. Nach GEMIS 3.0: Perspektiven...

Nach der Fertigstellung von GEMIS 3.0 steht in der nächsten Zeit die **Anwendung** des Modells in der Praxis im Mittelpunkt weiterer Arbeiten: in Energie- und Klimaschutzkonzepten, bei Stoffstromanalysen und als „Datenserver“ für Ökobilanzen und Stoffstromanalysen.

Aus diesen Anwendungen sollten Hinweise für zukünftige Erweiterungen der Daten gesammelt und Hilfstexte für AnwenderInnen erstellt werden, die auf den Internet-Seiten auch Dritten zugänglich gemacht werden.

Im *März 1999* ist eine weitere Datenaktualisierung geplant, wobei hierzu vorwiegend Ergebnisse aus laufenden Forschungsvorhaben für das Umweltbundesamt dienen (vgl. Öko 1997-1999) und eine *Beta-Version von GEMIS 3.x* bereitgestellt werden wird.

Voraussichtlich im Sommer 1999 wird dann die endgültige „extended“-Version 3.x veröffentlicht und das zugehörige Daten-update die auf Seite Z-5 genannten Erweiterungen der Datenbasis enthalten.

Weiterhin werden Anfang 1999 eigene Länderdatensätze für Luxemburg, Österreich und Tschechien auf den GEMIS-Seiten im Internet veröffentlicht.

Die Arbeiten zur englischen Version TEMIS 3.0 werden fortgeführt und im Laufe des Jahres 1999 abgeschlossen - TEMIS wird ebenfalls kostenlos über das Internet verfügbar sein. Ein spezieller Länderdatensatz für Italien ist in Vorbereitung.

Parallel zu GEMIS und TEMIS ist seit 1995 das sog. „ENVIRONMENTAL MANUAL FOR POWER DEVELOPMENT“ (kurz: EM) verfügbar, das in englischer Sprache die wichtigsten GEMIS-Optionen auch **für Entwicklungsländer**. Im Frühjahr 1999 wird die **EM Version 2.0** fertiggestellt, die nicht nur für Energiesysteme, sondern auch für Verkehrssysteme und - allerdings nur mit einigen Daten - Stoffprozessen ausgestattet ist ¹⁸.

Für das EM gibt es eigene Datensätze für verschiedene Länder (darunter China, Indien, Marokko, Polen, Südafrika), die kontinuierlich ausgeweitet werden.

Spätestens mit GEMIS 3.x werden die wichtigsten Informationen aus diesen Ländern auch für GEMIS verfügbar sein.

Soweit sich bis März bzw. Sommer 1999 Korrekturen des GEMIS-Programm als notwendig erweisen, werden auch diese auf den GEMIS-Seiten im Internet kostenlos bereitgestellt.

¹⁸ Das EM hat eigene homepages im Internet - <http://www.oeko.de/service/em>

6. Schlußbemerkung: Grenzen der EDV

Nachdem nun die neue Version des Computerprogramms vorgestellt wurde, sind noch einige Anmerkungen zum EDV-Einsatz zu machen und auf **Grenzen der Modellierung** mit GEMIS 3.0 hinzuweisen.

Das vorgelegte EDV-Modell ist trotz aller Ergänzungen noch immer das, was auch GEMIS 1.0 schon war: ein *Hilfsmittel* zur Umweltanalyse.

Die EDV erlaubt, Datenmengen zu erfassen und leicht verfügbar sowie änderbar zu machen, die derzeitige Hard- und Software erlaubt aber *nicht*, auf der Ebene von marktgängigen Personal Computern nutzbare "Experten"-Systeme bereitzustellen.

GEMIS 3.0 enthält zwar eine Vielzahl von Datenverknüpfungen und Rechenvorschriften, die aber einfach gehalten sind und überwiegend *linearen* Zusammenhängen folgen. Dies ist bei Nutzung der Stammdatensätze noch unproblematisch, da die Datenauswahl unter diesem Gesichtspunkt erfolgte.

Die Stärke des GEMIS-Modells, flexibel auf NutzerInnen-Anpassungen eingehen zu können, ist aber auch *gleichzeitig eine Gefahr*:

Bei der Datenanpassung prüft GEMIS 3.0 nur die *formale* Richtigkeit von Prozeßkettenstrukturen, die *inhaltliche* Konsistenz der Datenanpassungen kann dagegen nur in wenigen Ausnahmefällen (z.B. Brennstoffänderungen) automatisch durch das Modell geprüft werden.

Kurzum, GEMIS ist nicht "künstlich intelligent", kennt also weder Regeln zur Adaption komplexer Datenstrukturen noch *inhaltliche* Unterstützung bei der Neueingabe von Daten.

Soweit adaptierte oder ergänzte Daten eine Situation zutreffend beschreiben, wird GEMIS 3.0 als *Hilfsmittel* nützlich sein - es wird Bilanzierungen adäquat durchführen, Ergebnisse visualisieren, bei der Analyse der Auswirkungen unsicherer Daten helfen usw.

Die Last der konsistenten Datenanpassung liegt aber ganz überwiegend bei den NutzerInnen.

7. Relevante Literatur zu GEMIS

- ETH (Eidgenössische Technische Hochschule) 1996: Ökoinventare für Energiesysteme (2. Auflage), R. Frischknecht u.a., Institut für Energietechnik, Laboratorium für Energiesysteme, ETH Zürich
- ÖKO (Öko-Institut) 1992: Analyse von Datenbasen für Treibhausgas-Emissionen in der BRD, U.R.Fritsche/F.C.Matthes, i.A. von BMFT/KFA-TFF im Teilprojekt 9 der IKARUS-Studie, Darmstadt/Berlin (veröffentlicht als Bericht 2614 der KFA Jülich)
- ÖKO (Öko-Institut) 1993a: Emissionen des Energie-Imports der Bundesrepublik Deutschland, U.R.Fritsche/F.C.Matthes, i.A. von BMFT/DIW im Teilprojekt 3 der IKARUS-Studie, Berlin/Darmstadt
- ÖKO (Öko-Institut) 1993b: Aktualisierung und Ergänzung der Emissionsmatrix klimarelevanter Schadstoffe für das Teilgebiet Industrie, U.R.Fritsche/F.C.Matthes, i.A. von BMFT/ISI im Teilprojekt 6 der IKARUS-Studie, Darmstadt/Berlin
- ÖKO (Öko-Institut) 1993c: Identifikation und Analyse von Datenquellen für nichtenergiebedingte Treibhausgas-Emissionsdatenbasen. M.Buchert/U.R.Fritsche/F.C.Matthes, i.A. von BMFT/KFA TFF im Teilprojekt 9 der IKARUS-Studie, Bericht 2837 der KFA Jülich
- ÖKO (Öko-Institut)/GhK (Gesamthochschule Kassel) 1989: Umweltanalyse von Energiesystemen: Gesamt-Emissions-Modell Integrierter Systeme (GEMIS), U.Fritsche/L.Rausch/K.-H.Simon., i.A. des Hessischen Ministeriums für Umwelt, Energie und Bundesangelegenheiten (HMUEB), Wiesbaden (vergriffen)
- ÖKO (Öko-Institut)/GhK (Gesamthochschule Kassel) 1992: Umweltanalyse für Energie-, Transport- und Stoffsysteme: Gesamt-Emissions-Modell Integrierter Systeme (GEMIS) Version 2.0, i.A. des HMUEB, Wiesbaden (vergriffen)
- ÖKO (Öko-Institut) 1994: Umweltanalyse für Energie-, Transport- und Stoffsysteme: Gesamt-Emissions-Modell Integrierter Systeme (GEMIS) Version 2.1 - Aktualisierter und erweiterter Endbericht, i.A. des HMUEB, Wiesbaden 1995 (vergriffen - Bezug jedoch als PDF-Datei über Internet-Homepage <http://www.oeko.de/service/gemis> möglich sowie auf GEMIS-CDROM enthalten)
- ÖKO (Öko-Institut) 1996: Umweltanalyse für Energie-, Transport- und Stoffsysteme: Gesamt-Emissions-Modell Integrierter Systeme (GEMIS) Version 3.0 - Installationsdateien mit Programm und Datenbank, Bezug über Internet-Homepage <http://www.oeko.de/service/gemis/>, i.A. des Hessischen Ministeriums für Umwelt, Energie, Jugend, Familie und Gesundheit
- ÖKO (Öko-Institut) 1997a: Bedürfnisse und Stoffströme, Kurzfassung zum F&E-Vorhaben „Stoffflußbezogene Bausteine für ein nationales Konzept der nachhaltigen Entwicklung - Fallbeispiel Bauen und Wohnen“, i.A. des UBA, Darmstadt/Freiburg/Berlin
- ÖKO (Öko-Institut) 1997b: Bilanzierung der Umweltauswirkungen bei der Gewinnung von Platingruppenmetallen für Pkw-Abgaskatalysatoren, C.Hochfeld, Werkstattreihe des Öko-Instituts Nr. 101, Freiburg
- ÖKO (Öko-Institut) 1998: Stoffflußbezogene Bausteine für ein nationales Konzept der nachhaltigen Entwicklung - Fallbeispiel Bauen und Wohnen, Endbericht und Anhangband zum F&E-Vorhaben des Umweltbundesamts (Veröffentlichung in der UBA-TEXTE-Reihe 1999)
- ÖKO (Öko-Institut) 1999: Erarbeitung von Basisdaten zum Energieaufwand und der Umweltbelastung von energieintensiven Produkten und Dienstleistungen für Ökobilanzen und Öko-Audits, laufendes F&E-Vorhaben Nr. 104 01 123 i.A. des Umweltbundesamts, wird 1999 veröffentlicht
- UBA (Umweltbundesamt) 1996: Handbuch Emissionsfaktoren, Version 1.1 (Oktober 1996), CDROM-Datenbank, Berlin/Bern

Angang: Daten zu Vorketten in Tabellen

Dieser Anhang enthält die wichtigsten Ergebnisse der Berechnung für **vorgelagerte Prozeßketten** mit GEMIS in Form von Tabellen - damit können AnwenderInnen auch ohne Verwendung des Computermodells eigene Berechnungen durchführen.

Hierzu wurden mit GEMIS Szenarien berechnet, die jeweils eine bestimmte Energie- bzw. Stoffbereitstellung bezogen auf eine definierte „Schnittstelle“ umfassen:

- Bei der Energiebereitstellung wurden wichtigste Prozeßketten zur Lieferung von **Endenergie** für verschiedene „Tiefen“ der Prozeßketten analysiert, z.B. Kohle- und Ölimporte aus verschiedenen Ländern sowie Verarbeitungsstufen (z.B. Rohkohle, Brikett). Außerdem wurden die internationalen bzw. nationalen Transporte einbezogen (z.B. Schiff, Bahn, Pipeline, Tanker) und die wichtigsten „Mixe“ frei Verbraucher ausgegeben.
- Bei der Stoffbereitstellung wurden ebenfalls die wichtigsten Prozeßketten zur Lieferung von **Materialien** frei deutschem Verbraucher zusammengefaßt und zusätzlich nochmals eine Aufspaltung nach Herkunftsländern (bei Importen) bzw. Einzeltechniken (z.B. Elektro- und Oxygenstahl) vorgenommen.
- Für alle diese Prozeßketten werden die Luftschadstoffe, Treibhausgase, feste Reststoffe sowie die Ressourcenbedarfe einzeln ausgewiesen.
- Auf eine - im GEMIS-Programm enthaltene - Differenzierung der jeweiligen Ergebnisse nach deutschen und ausländischen Anteilen sowie verursachenden Prozessen wurde aus Platzgründen verzichtet.

Beachten Sie bitte, daß die jeweiligen Energie-Prozeßketten **nicht** die Umwandlung der bereitgestellten Endenergien zu Nutzenergie beinhalten, sondern nur die Umwelteffekte bis zur Bereitstellung der Endenergie.

Dies bedeutet, daß z.B. die Prozeßkette „Öl-EL-Lkw“ die gesamten vorgelagerten Effekte der Bereitstellung des Heizöls umfaßt, **nicht** jedoch die eigentliche Nutzung des Heizöls (z.B. Verbrennung in einer Heizung).

Zur Durchführung kompletter Bilanzrechnungen empfehlen wir die Verwendung des GEMIS-Computerprogramms, mit dem auch die o.g. Ergebnisse berechnet wurden.

A-1 Vorgelagerte Emissionen bei der Bereitstellung von Braunkohle

A-1.1 Luftschadstoffe bei der Bereitstellung von Kohle

[kg/TJend]	SO ₂	NO _x	Staub	CO	NMVOC
BrK-rhein-roh	1,5	2,8	0,4	1,0	0,1
BrK-Brik-rhein-Lkw	10,1	19,4	1,9	9,5	1,6
BrK-roh-Leipzig	0,6	1,1	0,1	0,5	0,0
BrK-Brik-Leipzig-Lkw	3,5	5,8	50,7	2,2	0,4
BrK-roh-Lausitz	1,5	2,1	0,3	0,8	0,0
BrK-Brik-Lausitz-Lkw	4,5	7,0	50,8	2,5	0,4
StK-Brik-Lkw	6,6	7,6	0,4	2,6	0,7
StK-Imp-AUS	95,8	89,0	10,3	18,5	4,8
StK-Imp-US	34,7	37,8	5,7	9,5	3,2
StK-Imp-RSA	79,2	70,4	12,0	13,8	2,7
StK-Imp-GUS	60,3	24,2	18,4	14,4	1,3
StK-Imp-PL	31,8	23,1	7,9	3,1	0,1
StK-Imp-mix	48,1	43,1	8,8	10,4	2,6
StK-Förd-Voll-D	5,7	2,6	0,1	0,7	0,1
StK-Förd-Ballast-D	5,7	2,6	0,1	0,7	0,1
StK-Transport-Voll-D	5,9	4,5	0,2	1,3	0,3
StK-Transport-mix-D	12,3	10,6	1,5	2,8	0,7

BrK = Braunkohle; StK = Steinkohle; Brik = Brikett; rhein = rheinisches Revier; Förd. = Förderung; Imp = Import

A-1.2 Treibhausgase bei der Bereitstellung von Kohle

[kg/TJend]	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO ₂ -Äquiv.
BrK-rhein-roh	3.816	1,8	0,1	3.886
BrK-Brik-rhein-Lkw	20.248	6,5	5,6	22.108
BrK-roh-Leipzig	803	1,6	0,0	843
BrK-Brik-Leipzig-Lkw	4.788	2,7	0,1	4.890
BrK-roh-Lausitz	2.065	1,9	0,1	2.122
BrK-Brik-Lausitz-Lkw	6.284	3,0	0,2	6.403
StK-Brik-Lkw	5.027	543,4	0,1	16.483
StK-Imp-AUS	8.383	107,8	0,1	10.675
StK-Imp-US	3.725	107,5	0,1	6.005
StK-Imp-RSA	7.537	515,8	0,1	18.415
StK-Imp-GUS	9.695	134,3	0,3	12.624
StK-Imp-PL	4.164	635,8	0,2	17.587
StK-Imp-mix	5.319	265,1	0,1	10.928
StK-Förd-Voll-D	3.738	538,3	0,1	15.069
StK-Förd-Ballast-D	3.738	538,3	0,1	15.068
StK-Transport-Voll-D	4.028	539,5	0,1	15.386
StK-Transport-mix-D	4.266	498,5	0,1	14.764

CO₂-Äquivalente für 100 Jahre Integrationszeit, nur direkte Treibhauswirkung

BrK = Braunkohle; StK = Steinkohle; Brik = Brikett; rhein = rheinisches Revier; Förd. = Förderung; Imp = Import

A-1.3 Feste Reststoffe bei der Bereitstellung von Kohle

[kg/TJend]	Asche	REA-Reststoff	Prod.abfall	Abraum
BrK-rhein-roh	60,4	41,5	3,8	729.200
BrK-Brik-rhein-Lkw	620,2	77,3	55,0	825.200
BrK-roh-Leipzig	19,4	30,2	3,3	711.200
BrK-Brik-Leipzig-Lkw	92,6	172,9	11,7	757.200
BrK-roh-Lausitz	26,9	75,4	3,7	1.526.000
BrK-Brik-Lausitz-Lkw	88,1	222,7	12,2	1.594.000
StK-Brik-Lkw	201,3	165,9	1.292,7	34.234
StK-Imp-AUS	0,0	0,0	47,7	200.000
StK-Imp-US	2,8	5,6	29,7	396.700
StK-Imp-RSA	36,7	0,0	39,0	41.671
StK-Imp-GUS	39,1	0,0	82,8	116.800
StK-Imp-PL	35,1	0,0	11,9	40.263
StK-Imp-mix	18,1	3,1	35,5	244.300
StK-Förd-Voll-D	186,0	149,5	1.257,6	30.682
StK-Förd-Ballast-D	186,0	149,5	31.857,5	82
StK-Transport-Voll-D	186,9	151,6	1.261,8	30.839
StK-Transport-mix-D	161,7	129,6	1.078,3	62.921

BrK = Braunkohle; StK = Steinkohle; Brik = Brikett; rhein = rheinisches Revier; Förd. = Förderung; Imp = Import

A-1.4 Ressourcenbedarfe bei der Bereitstellung von Kohle

Ressourcenbilanz	Primärenergie	Rohstoffe [kg/TJend]		Wasser	Fläche
	[TJ/TJend]	Erze	Mineralien		[m ² /TJend]
BrK-rhein-roh	1,033	21	43	729.300	1,645
BrK-Brik-rhein-Lkw	1,196	67	151	829.900	2,149
BrK-roh-Leipzig	1,008	19	39	712.700	1,601
BrK-Brik-Leipzig-Lkw	1,058	53	249	751.700	1,722
BrK-roh-Lausitz	1,018	20	98	721.900	1,620
BrK-Brik-Lausitz-Lkw	1,069	56	311	761.300	1,742
StK-Brik-Lkw	1,066	69	229	134.100	0,518
StK-Imp-AUS	1,116	248	70	5.804	0,467
StK-Imp-US	1,059	157	50	5.790	0,456
StK-Imp-RSA	1,094	205	89	25.875	0,101
StK-Imp-GUS	1,207	461	810	32.719	0,457
StK-Imp-PL	1,044	65	53	69.346	0,290
StK-Imp-mix	1,081	190	136	19.860	0,351
StK-Förd-Voll-D	1,042	34	151	127.800	0,092
StK-Förd-Ballast-D	1,042	34	151	8.713	0,092
StK-Transport-Voll-D	1,047	43	158	128.400	0,094
StK-Transport-mix-D	1,053	66	156	112.200	0,133

BrK = Braunkohle; StK = Steinkohle; Brik = Brikett; rhein = rheinisches Revier; Förd. = Förderung; Imp = Import

A-2 Vorgelagerte Emissionen bei Öl- und Gasprodukten

A-2.1 Luftschadstoffe bei Öl- und Gasprodukten

[kg/TJend]	SO ₂	NO _x	Staub	CO	NM VOC
Öl-roh-Import-EU	0,1	2,5	0,1	1,7	1,3
Öl-roh-Import-GUS	26,3	18,1	4,7	6,6	17,9
Öl-roh-Import-OPEC	33,5	28,1	3,0	6,2	4,2
Öl-roh-mix-D	25,6	21,0	2,9	5,5	7,1
Öl-EL-Lkw	30,0	27,5	3,3	8,3	18,0
Öl-EL-Zug	29,9	24,9	3,2	7,4	17,6
Öl-S-Zug	34,0	28,5	3,4	9,0	18,1
Tankstelle Benzin	42,3	38,4	4,1	13,0	152,5
Tankstelle Diesel	30,0	27,5	3,3	8,3	18,0
Erdgas-Import-GUS	4,4	19,2	2,1	18,0	1,1
Erdgas-Import-NL	0,7	3,0	0,5	3,2	0,1
Erdgas-Import-NOR	0,5	4,4	0,4	5,0	0,1
Erdgas-Aufbereitung-D	1,0	2,5	0,3	3,0	0,2
Erdgas-HH&KV	1,9	9,1	1,0	9,0	0,5
Erdgas-KW&IN	1,9	9,0	0,9	8,8	0,5
Tanker-LNG-Algerien	8,8	67,1	1,8	33,5	2,6
Tanker-LH2-Afrika	13,1	180,8	5,1	61,6	4,1
Tanker-LH2-CAN	13,4	185,6	5,3	63,2	4,4
Lkw-LH2-Afrika	9,9	127,2	3,1	67,0	6,2
Lkw-LH2-CAN	10,2	130,9	3,3	68,7	6,5

A-2.2 Treibhausgase bei Öl- und Gasprodukten

[kg/TJend]	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO ₂ -Äquiv.
Öl-roh-Import-EU	984	3,2	0,0	1.059
Öl-roh-Import-GUS	5.225	30,4	0,1	5.893
Öl-roh-Import-OPEC	3.479	5,9	0,0	3.615
Öl-roh-mix-D	3.621	11,5	0,1	3.878
Öl-EL-Lkw	6.570	16,1	0,1	6.946
Öl-EL-Zug	6.380	16,3	0,1	6.754
Öl-S-Zug	9.040	19,8	0,2	9.503
Tankstelle Benzin	14.562	26,6	0,3	15.201
Tankstelle Diesel	6.588	16,2	0,1	6.965
Erdgas-Import-GUS	4.198	383,4	0,2	12.298
Erdgas-Import-NL	872	48,2	0,0	1.895
Erdgas-Import-NOR	1.154	55,8	0,0	2.338
Erdgas-Aufbereitung-D	1.671	34,3	0,1	2.408
Erdgas-HH&KV	2.287	293,2	0,1	8.470
Erdgas-KW&IN	2.261	156,1	0,1	5.564
Tanker-LNG-Algerien	10.708	158,9	0,5	14.186
Tanker-LH2-Afrika	49.616	96,0	2,1	52.635
Tanker-LH2-CAN	50.723	97,9	2,2	53.806
Lkw-LH2-Afrika	42.771	42,7	0,2	43.772
Lkw-LH2-CAN	43.741	43,6	0,2	44.766

CO₂-Äquivalente für 100 Jahre Integrationszeit, nur direkte Treibhauswirkung

A-2.3 Reststoffe bei Öl- und Gasprodukten

[kg/TJend]	Asche	REA-Restoff	Prod.abfall	Abraum
Öl-roh-Import-EU	0,0	0,0	13,6	78
Öl-roh-Import-GUS	5,1	0,0	15,0	686
Öl-roh-Import-OPEC	0,0	0,0	17,4	81
Öl-roh-mix-D	1,4	0,1	16,2	250
Öl-EL-Lkw	8,7	8,0	59,6	1.999
Öl-EL-Zug	9,1	9,1	59,0	2.047
Öl-S-Zug	16,4	17,0	72,2	3.757
Tankstelle Benzin	30,8	32,1	99,6	7.184
Tankstelle Diesel	9,0	8,4	60,1	2.066
Erdgas-Import-GUS	2,5	0,2	140,9	1.202
Erdgas-Import-NL	2,8	6,0	39,5	649
Erdgas-Import-NOR	0,4	0,3	60,6	535
Erdgas-Aufbereitung-D	17,5	19,0	60,1	4.356
Erdgas-HH&KV	4,6	4,6	88,1	1.503
Erdgas-KW&IN	4,6	4,6	85,7	1.474
Tanker-LNG-Algerien	0,4	0,3	43,6	440
Tanker-LH2-Afrika	47,7	47,8	381,7	13.928
Tanker-LH2-CAN	48,6	48,8	390,2	14.213
Lkw-LH2-Afrika	9,7	8,5	145,5	6.083
Lkw-LH2-CAN	9,9	8,7	149,4	6.212

A-2.4 Ressourcenbedarfe bei Öl- und Gasprodukten

Ressourcenbilanz	Primärenergie [TJ/TJend]	Rohstoffe [kg/TJend]			Fläche [m²/TJend]
		Erze	Mineralien	Wasser	
Öl-roh-Import-EU	1,012	76	77	402	0,01
Öl-roh-Import-GUS	1,040	82	250	3.494	0,24
Öl-roh-Import-OPEC	1,037	94	34	479	0,02
Öl-roh-mix-D	1,036	87	95	1.242	0,08
Öl-EL-Lkw	1,087	127	151	4.306	0,66
Öl-EL-Zug	1,085	121	151	4.484	0,66
Öl-S-Zug	1,127	132	181	7.382	0,74
Tankstelle Benzin	1,214	160	239	13.076	0,91
Tankstelle Diesel	1,087	127	151	4.417	0,66
Erdgas-Import-GUS	1,138	788	1.769	5.464	0,24
Erdgas-Import-NL	1,013	219	420	1.915	0,22
Erdgas-Import-NOR	1,018	337	656	1.968	0,27
Erdgas-Aufbereitung-D	1,026	187	358	7.819	0,43
Erdgas-HH&KV	1,066	465	1.069	4.305	0,28
Erdgas-KW&IN	1,059	451	958	4.220	0,28
Tanker-LNG-Algerien	1,189	240	406	26.937	0,26
Tanker-LH2-Afrika	2,173	1.655	4.550	37.185	156,00
Tanker-LH2-CAN	2,218	1.693	4.643	37.959	159,10
Lkw-LH2-Afrika	2,011	673	7.330	76.301	2,79
Lkw-LH2-CAN	2,052	691	7.478	77.858	2,85

A-3 Emissionen bei der Bereitstellung von Strom

A-3.1 Luftschadstoffe bei der Bereitstellung von Strom

[kg/TJend]	SO ₂	NO _x	Staub	CO	NMVOC
Netz-lokal	118	257	16	107	26
Netz-Hochspannung	115	252	15	103	25
Netz-Grundlast	128	138	17	39	3
Netz-Bahnstrom	132	248	11	106	25
Netz-el-Heizstrom-Kohle	194	156	9	62	11
Netz-el-Heizstrom-mix	178	146	10	58	10
EI-Park Ost	147	201	21	95	6
EI-Park West	109	255	14	101	27
EI-Park Bahn Ost	117	236	13	99	23
EI-Park Bahn West	123	229	10	98	23
EI-Park AUS	1659	691	59	128	52
EI-Park CAN	77	166	9	52	22
EI-Park GUS	1569	612	456	249	35
EI-Park NL	179	546	141	124	39
EI-Park NOR	2	8	2	4	0
EI-Park-PL	3291	2387	815	248	7
EI-Park RSA	2255	1054	460	197	26
EI-Park USA	220	661	27	201	69

A-3.2 Treibhausgase bei der Bereitstellung von Strom

[kg/TJend]	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO ₂ -Äquiv.
Netz-lokal	180.100	429,3	6,8	191.300
Netz-Hochspannung	176.600	420,7	6,7	187.500
Netz-Grundlast	172.900	188,3	4,6	178.300
Netz-Bahnstrom	170.600	655,4	7,9	186.800
Netz-el-Heizstrom-Kohle	251.900	1.286,5	12,9	283.000
Netz-el-Heizstrom-mix	226.900	1.153,0	11,6	254.700
EI-Park Ost	233.900	126,0	7,3	238.800
EI-Park West	167.000	453,5	6,5	178.500
EI-Park Bahn Ost	168.700	476,3	6,9	180.800
EI-Park Bahn West	155.300	639,5	7,5	171.100
EI-Park AUS	236.700	260,9	13,4	246.300
EI-Park CAN	59.182	50,9	2,7	61.078
EI-Park GUS	249.800	373,4	8,9	260.400
EI-Park NL	147.600	135,5	7,1	152.700
EI-Park NOR	3.333	4,3	0,1	3.451
EI-Park-PL	426.800	2.749,6	23,9	491.900
EI-Park RSA	256.800	754,1	11,9	276.300
EI-Park USA	194.000	192,8	10,2	201.200

CO₂-Äquivalente für 100 Jahre Integrationszeit, nur direkte Treibhauswirkung

A-3.3 Feste Reststoffe bei der Bereitstellung von Strom

[kg/TJend]	Asche	REA-Reststoff	Prod.abfall	Abraum
Netz-lokal	2.852	3.114	4.860	668.300
Netz-Hochspannung	2.798	3.055	4.462	654.900
Netz-Grundlast	3.789	3.909	10.718	1.107.000
Netz-Bahnstrom	1.113	2.997	1.884	171.000
Netz-el-Heizstrom-Kohle	1.644	4.734	2.885	163.500
Netz-el-Heizstrom-mix	1.484	4.248	2.622	150.000
EI-Park Ost	3.238	7.398	109	2.240.000
EI-Park West	2.709	2.456	4.863	441.200
EI-Park Bahn Ost	2.105	3.126	2.922	465.700
EI-Park Bahn West	762	2.688	1.450	81.451
EI-Park AUS	3	63	150	460.300
EI-Park CAN	5	1.587	78	73.682
EI-Park GUS	981	3	146	116.400
EI-Park NL	1.184	2.737	141	127.900
EI-Park NOR	16	10	55	4.961
EI-Park-PL	3.604	1	144	174.900
EI-Park RSA	2.622	1	158	60.756
EI-Park USA	1.421	4.014	177	586.800

A-3.4 Ressourcenbedarfe bei der Bereitstellung von Strom

Ressourcenbilanz	Primärenergie	Rohstoffe [kg/TJend]		Wasser	Fläche [m²/TJend]
	[TJ/TJend]	Erze	Mineralien		
Netz-lokal	2,939	2.040	6.162	1.115.000	75,87
Netz-Hochspannung	2,881	1.102	5.469	1.092.000	25,41
Netz-Grundlast	2,833	780	5.766	1.244.000	25,98
Netz-Bahnstrom	2,739	1.003	7.475	637.900	1,64
Netz-el-Heizstrom-Kohle	2,719	834	5.085	809.100	0,96
Netz-el-Heizstrom-mix	2,932	815	4.950	824.600	1,16
EI-Park Ost	2,429	570	9.627	3.074.000	3,35
EI-Park West	2,905	747	4.561	820.800	2,25
EI-Park Bahn Ost	2,672	802	6.082	893.600	1,96
EI-Park Bahn West	2,502	960	7.131	515.000	1,15
EI-Park AUS	2,594	816	2.420	507.200	6,33
EI-Park CAN	1,883	382	5.172	214.400	1,31
EI-Park GUS	3,861	707	19.253	593.500	2,25
EI-Park NL	2,531	718	3.675	284.500	1,36
EI-Park NOR	1,019	252	5.134	6.515	55,55
EI-Park-PL	4,508	793	1.837	1.165.000	1,37
EI-Park RSA	2,991	709	1.470	568.800	0,71
EI-Park USA	2,923	936	6.228	429.400	6,74

A-4 Vorgelagerte Emissionen bei regenerativen Energien

A-4.1 Luftschadstoffe bei regenerativen Energien

[kg/TJend]	SO ₂	NO _x	Staub	CO	NM VOC
Lkw-Stückholz	0,3	4,4	0,2	1,5	0,6
Lkw-HHS	2,5	41,4	3,3	11,5	1,8
Holzgas-dezentral	-0,2	14,0	0,6	2,8	0,7
Holzgas-zentral	1,9	51,0	3,7	12,8	1,9
Lkw-Stückholz-NR	6,2	53,6	4,2	15,9	2,8
Lkw-HHS-NR	5,7	64,3	4,6	17,3	2,9
Holzgas-NR-dezentral	8,6	58,7	4,5	18,0	3,3
Holzgas-NR-zentral	8,0	69,4	4,9	19,4	3,4
Lkw-Stroh	0,3	4,5	0,2	1,5	0,6
Lkw-Strohcob	1,9	11,2	0,7	5,4	1,4
Biogas-dezentral	14,7	216,4	27,6	231,6	30,7
Biogas-zentral	15,8	173,8	23,4	139,6	35,5
Biomüllgas-zentral	5,6	42,0	13,2	105,0	17,8
Lkw-Miscanthus	2,2	22,6	1,4	5,4	1,4
Lkw-Rapsöl	55,1	143,9	12,3	80,0	3,6
Lkw-RME	60,8	159,5	13,3	85,6	4,6
LkwBioäthanol	51,7	246,0	14,7	46,5	11,7

A-4.2 Treibhausgase bei regenerativen Energien

[kg/TJend]	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO ₂ -Äquiv.
Lkw-Stückholz	414	0,2	0,0	427
Lkw-HHS	3.526	1,4	0,2	3.605
Holzgas-dezentral	1.725	2,7	22,2	8.655
Holzgas-zentral	4.850	4,0	22,5	11.917
Lkw-Stückholz-NR	9.257	14,3	0,4	9.677
Lkw-HHS-NR	10.728	17,2	25,2	18.912
Holzgas-NR-dezentral	12.816	22,8	0,5	13.457
Holzgas-NR-zentral	14.287	25,7	25,4	22.692
Lkw-Stroh	417	0,2	0,0	430
Lkw-Strohcob	2.670	5,1	0,1	2.817
Biogas-dezentral	811	40,4	5,4	3.328
Biogas-zentral	12.583	22,2	1,9	13.651
Biomüllgas-zentral	2.198	14,3	0,5	2.669
Lkw-Miscanthus	3.212	3,1	10,9	6.664
Lkw-Rapsöl	25.443	55,3	191,0	85.811
Lkw-RME	30.142	91,9	193,1	91.925
LkwBioäthanol	46.775	23,1	69,0	68.655

CO₂-Äquivalente für 100 Jahre Integrationszeit, nur direkte Treibhauswirkung

A-4.3 Feste Reststoffe bei regenerativen Energien

[kg/TJend]	Asche	REA-Reststo	Prod.abfall	Abraum
Lkw-Stückholz	0	0	3	24
Lkw-HHS	0	0	30	209
Holzgas-dezentral	0	0	5	64
Holzgas-zentral	0	1	32	249
Lkw-Stückholz-NR	85	93	178	20.041
Lkw-HHS-NR	85	93	179	20.085
Holzgas-NR-dezentral	141	154	274	33.247
Holzgas-NR-zentral	141	154	275	33.288
Lkw-Stroh	0	0	3	25
Lkw-Strohcob	29	31	77	6.825
Biogas-dezentral	227	1	23.563	1.122
Biogas-zentral	83	2	14.818	1.157
Biomüllgas-zentral	31	0	11.192	350
Lkw-Miscanthus	7	8	19	1.772
Lkw-Rapsöl	145	83	75.111	22.713
Lkw-RME	181	121	76.366	31.288
LkwBioäthanol	34	36	102	8.316

A-4.4 Ressourcenbedarfe bei regenerativen Energien

Ressourcenbilanz	Primärenerg [TJ/TJend]	Rohstoffe [kg/TJend]		Wasser	Fläche [m²/TJend]
		Erze	Mineralien		
Lkw-Stückholz	1,006	18	5	110	0,00
Lkw-HHS	1,058	162	47	972	0,58
Holzgas-dezentral	1,027	26	22	141.200	317,10
Holzgas-zentral	1,079	171	65	143.500	320,90
Lkw-Stückholz-NR	1,262	240	231	34.116	2,90
Lkw-HHS-NR	1,286	249	250	192.400	358,80
Holzgas-NR-dezentral	1,32	280	350	56.141	4,38
Holzgas-NR-zentral	1,344	289	369	214.500	360,30
Lkw-Stroh	1,006	18	5	111	0,00
Lkw-Strohcob	1,041	178	104	11.973	1,32
Biogas-dezentral	8,714	269	1.309	2.374	0,04
Biogas-zentral	5,612	650	642	4.265	0,12
Biomüllgas-zentral	4,163	155	284	1.079	13,27
Lkw-Miscanthus	1,047	39	35	72.197	317,30
Lkw-Rapsöl	1,35	171	22.896	1.586.000	16,26
Lkw-RME	1,565	308	23.644	1.617.000	30,70
LkwBioäthanol	1,879	205	723	407.000	11,19

A-5 Emissionen bei der Bereitstellung von Stoffen

A-5.1 Luftschadstoffe bei ausgewählter Stoffen

[kg/t]	SO ₂	NO _x	Staub	CO	NM VOC
Alu-AUS	121,7	47,2	31,5	161,8	3,3
Alu-D	37,9	21,5	28,3	117,7	1,0
Alu-GUS	141,7	52,0	75,2	172,2	3,3
Alu-NOR	44,9	17,0	28,1	117,0	0,8
Alu-Tropen	53,6	11,3	28,8	155,8	0,7
Alu-mix-D	82,329	31,649	42,796	145,783	1,916
Ammoniak	0,062	0,867	0,03	0,566	0,041
Dünger-N	-1,511	8,982	-0,059	0,316	-0,022
Glas	2,476	4,283	0,504	5,929	0,035
Kalk	0,074	0,584	0,193	23,361	0,03
Kupfer (primär)	21,63	29,72	3,73	12,509	0,585
Kunststoff-PVC	3,427	6,785	0,662	1,727	1,648
Mineralwolle	2,154	1,353	0,503	71,576	0,883
Stahl-mix D	2,763	3,36	1,792	25,962	0,17
Zement	0,196	2,052	0,327	0,296	0,065
Ziegel	0,135	0,434	0,035	0,44	0,004
Bauholz	0,5	3,3	0,3	9,2	0,2
Beton	0,1	0,7	0,1	0,2	0,0
Blei-primär	3,0	5,9	0,6	2,1	0,1
Dünger-Ca	0,1	0,6	0,2	23,3	0,0
Dünger-K	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0
Dünger-P	48,2	19,4	4,2	2,7	0,1
Kalksandstein	0,1	0,3	0,0	2,1	0,0
Kunststoff-PP	5,4	13,3	0,8	3,1	2,0
Kunststoff-PS	5,3	12,9	0,8	2,8	2,0
Kunststoff-HDPE	4,1	11,6	0,7	2,4	7,8
Papier-Zeitung	0,5	1,3	0,2	0,5	0,2
Stahl-Elektro	0,6	1,0	0,3	14,8	0,1
Stahl-Oxygen	3,3	4,0	2,2	28,8	0,2
Zink	6,1	10,4	1,1	3,9	0,2
Magnesium	63,0	35,8	11,4	35,5	3,2

A-5.2 Treibhausgase bei ausgewählten Stoffen

[kg/t]	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO ₂ -Äquiv.
Alu-AUS	17.536	17,0	0,8	24.035
Alu-D	13.408	11,5	0,3	19.635
Alu-GUS	20.766	27,3	0,7	27.429
Alu-NOR	5.592	1,8	0,1	11.554
Alu-Tropen	9.893	210,4	0,1	20.229
Alu-mix-D	14.888	49,9	0,4	21956
Ammoniak	1.893	4,8	0,0	1998
Dünger-N	1.776	4,8	12,0	5601
Glas	1.047	2,5	0,0	1106
Kalk	1.062	1,0	0,0	1086
Kupfer (primär)	5.517	16,0	0,4	5967
Kunststoff-PVC	2.769	3,2	0,1	2868
Mineralwolle	967	5,3	0,0	1082
Stahl-mix D	1.403	8,6	0,0	1587
Zement	946	1,0	0,0	974
Ziegel	229	0,2	0,0	234
Bauholz	713	0,8	0,0	743
Beton	168	0,2	0,0	174
Blei-primär	1.966	5,3	0,4	2.209
Dünger-Ca	1.046	0,9	0,0	1.069
Dünger-K	75	0,2	0,0	80
Dünger-P	4.185	27,2	0,1	4.792
Kalksandstein	139	0,1	0,0	143
Kunststoff-PP	4.606	5,5	0,2	4.771
Kunststoff-PS	3.958	3,5	0,1	4.075
Kunststoff-HDPE	3.419	2,8	0,1	3.509
Papier-Zeitung	1.042	1,6	0,0	1.084
Stahl-Elektro	560	2,0	0,0	606
Stahl-Oxygen	1.614	10,2	0,0	1.833
Zink	5.031	13,2	1,1	5.654
Magnesium	16.009	12,9	0,5	16.447

CO₂-Äquivalente für 100 Jahre Integrationszeit, nur direkte Treibhauswirkung

A-5.3 Feste Reststoffe bei ausgewählten Stoffen

[kg/t]	Asche	REA-Reststo	Prod.abfall	Abraum
Alu-AUS	33	9	1.215	29.512
Alu-D	191	197	1.725	58.042
Alu-GUS	111	6	1.246	13.875
Alu-NOR	10	6	1.210	7.450
Alu-Tropen	27	6	1.212	4.949
Alu-mix-D	106	69	1.392	28.295
Ammoniak	0	0	3	45
Dünger-N	-1	0	2	58
Glas	1	1	18	489
Kalk	1	1	2	513
Kupfer (primär)	49	16	57.301	109.600
Kunststoff-PVC	20	20	102	5.261
Mineralwolle	5	5	92	1.260
Stahl-mix D	0	0	395	1.739
Zement	2	2	4	1.344
Ziegel	1	1	2	359
Bauholz	3	3	5	755
Beton	1	1	1	1.064
Blei-primär	24	13	43	5.252
Dünger-Ca	0	0	2	462
Dünger-K	0	0	7.581	105
Dünger-P	74	1	70.209	4.355
Kalksandstein	0	0	1	179
Kunststoff-PP	20	21	46	4.529
Kunststoff-PS	6	5	16	1.043
Kunststoff-HDPE	5	4	14	965
Papier-Zeitung	41	16	37	3.722
Stahl-Elektro	5	5	188	1.398
Stahl-Oxygen	-1	-2	447	1.824
Zink	88	59	178	18.367
Magnesium	45	130	12	20.156

A-5.4 Ressourcenbedarfe ausgewählter Stoffe

Ressourcenbilanz	Primärenergie [GJ/t]	Rohstoffe [kg/t]			Fläche [m²/t]
		Erze	Mineralien	Wasser	
Alu-AUS	185,4	5.861	526	57.374	0,40
Alu-D	186,4	7.555	665	90.116	0,22
Alu-GUS	289,2	8.182	1.594	66.996	0,20
Alu-NOR	104,0	10.316	638	29.432	2,72
Alu-Tropen	103,6	7.170	388	29.250	0,12
Alu-mix-D	196,4	7.695	878	64.050	0,42
Ammoniak	32,3	14	29	629	0,01
Dünger-N	31,5	15	32	276.600	0,01
Glas	11,5	4	1.876	14.030	0,03
Kalk	4,9	2	2.216	2.248	0,02
Kupfer (primär)	70,6	161.300	400	206.500	0,12
Kunststoff-PVC	69,8	12	591	497.600	0,18
Mineralwolle	14,7	3	1.446	16.076	0,09
Stahl-mix D	20,2	2.222	582	11.127	0,02
Zement	4,8	1	1.826	1.518	0,04
Ziegel	2,1	1	1.488	355	0,01
Bauholz	10,4	3	786	1.754	0,07
Beton	1,6	1	8.985	1.368	0,02
Blei-primär	28,1	2.150	358	5.747	0,09
Dünger-Ca	4,6	2	2.210	2.631	0,01
Dünger-K	1,3	1	13.104	9.289	0,01
Dünger-P	41,7	13	4.924	866.900	0,02
Kalksandstein	1,1	0	1.276	513	0,01
Kunststoff-PP	130,4	21	55	8.936	0,23
Kunststoff-PS	123,7	17	27	7.281	0,10
Kunststoff-HDPE	111,4	14	24	2.987	0,09
Papier-Zeitung	18,0	6	38	15.335	0,09
Stahl-Elektro	8,1	292	196	3.169	0,05
Stahl-Oxygen	23,2	2.705	678	13.116	0,01
Zink	70,7	1.017	178	21.026	0,38
Magnesium	246,9	7.579	613	23.855	0,80