

Forschungsbericht

**Modellierung
systemübergreifender
Energie- und
Kohlenstoffbilanzen in
Entwicklungsländern**

Bernhard Frey

Modellierung systemübergreifender Energie- und Kohlenstoffbilanzen in Entwicklungsländern

Von der Fakultät Maschinenbau der Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von
Bernhard Frey
geboren in Freiburg

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. A. Voß
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. habil. G. Baumbach
Tag der Einreichung: 31. Januar 2005
Tag der mündlichen Prüfung: 02. Mai 2006

Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Stuttgart
Prof. Dr.-Ing. A. Voß
Abteilung Systemanalyse und Erneuerbare Energien (SEE)
Dr. sc. agr. L. Eltrop

2006

ISSN 0938-1228

D 93 (Dissertation der Universität Stuttgart)

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Angestellter am Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung der Universität Stuttgart. Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Alfred Voß für die Übernahme des Hauptberichts. Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Günter Baumbach danke ich sehr, dass er freundlicherweise den Mitbericht übernommen hat.

Für die vielfältigen Anregungen sowie das kritische Lesen der Arbeit bedanke ich mich sehr bei meinen beiden Lektoren Herrn Dr.-Ing. Christoph Schlenzig (Seven2one GmbH) und Herrn Dr. sc. agr. Ludger Eltrop.

An dieser Stelle möchte ich mich für den kollegialen Austausch und die konstruktive Zusammenarbeit am IER bedanken.

Des weiteren danke ich dem gesamten CHAPOSA-Team für die freundliche Zusammenarbeit während meiner Arbeitsaufenthalte in Afrika; insbesondere Herrn Prof. Dr. Emmanuel Chidumayo, Herrn Prof. Rogers Malimbwi und Herrn Dr. Anders Ellegard (SEI). Herrn Dipl.-Ing. Markus Neubauer und Herrn Dipl.-Ing. Wendelin Waiblinger danke ich für die tolle Zusammenarbeit in den Projekten am IER und die Unterstützung bei der Datenrecherche für meine Fallstudie. Bei unserem Systemadministrator Herrn Dr. sc. agr. Jörg Haigis bedanke ich mich für die unkomplizierte und rasche Hilfe bei allen EDV-Fragen und bei Frau Dipl.-Ing. Petra Neuser für die schnelle Durchsicht der Arbeit vor der Drucklegung. Herrn Assessor des Lehramts für Mathematik und Physik Christoph Kruck danke ich für die Diskussionen über meine mathematischen Gleichungen. Frau Dr. Pauline M. Midgley, Herrn Dipl.-Chem. R.-p. Owsianowski (GTZ) und Herrn Dr. Ing. Jörg Baur (GTZ) danke ich für ihre Informationen und das Interesse an meiner Arbeit.

Für das zügige Lesen meiner Entwürfe und die Diskussionen bedanke ich mich sehr bei Frau Dipl. Handelslehrerin Steffanie Huder und insbesondere bei Frau Dipl. Geographin Caroline Babendererde.

Ganz besonders herzlich bedanke ich mich bei Frau Dipl.-Ing. Anna Vabitsch für die vielfältige persönliche Unterstützung und die fachlichen Diskussionen.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abbildungen	V
Tabellen	VII
Abkürzungen	IX
Kurzfassung	XI
Abstract	XII
1 Einführung in das Thema	1
1.1 Problembeschreibung.....	1
1.2 Spannungsfeld der Interessen als Problemursache	2
1.3 Problemanalyse im Rahmen von Energie- und Kohlenstoffbilanzen	3
1.4 Aufbau der Arbeit	4
2 Zielsetzung	7
3 Methoden für die Energie- und Kohlenstoffbilanzierung	11
3.1 Systemwissenschaft	11
3.2 Modellsysteme zur Energie- und Kohlenstoffbilanzierung	16
3.2.1 Optimierung.....	17
3.2.2 Simulation	18
3.2.3 Vergleich von Simulation und Optimierung	19
3.3 MESAP PlaNet und LEAP	21
3.3.1 Simulationsmodul PlaNet.....	22
3.3.2 Simulationsmodell LEAP.....	23
3.3.3 Bisherige Anwendungen von MESAP PlaNet in Entwicklungsländern	24
3.4 Waldwachstumsmodelle als Grundlage einer Kohlenstoffbilanzierung.....	25
3.4.1 Historie und gegenwärtige Situation	25
3.4.2 Einzelbaum- und Größenklassenmodelle	26
3.4.3 Bestandesmodelle	26
3.4.4 Regionale Waldwachstumsmodelle	29
3.4.5 Kohlenstoffvorräte in Waldsystemen	31
3.4.6 Methoden zur Ermittlung der Kohlenstoffvorräte in Böden	32
3.5 System-Dynamics-Modelle	34
3.6 Modellbildung mit zellulären Automaten.....	35
3.7 Notwendigkeit einer integrierten Energie- und CO ₂ -Bilanzierung	37
4 Entwicklung einer systemübergreifenden Energie- und CO₂-Bilanzierung	41
4.1 Qualitative System- und Modellbeschreibung.....	41

4.1.1	Systemgrenzen und Realitätsausschnitt	43
4.1.2	Strukturierung der Modellbildung	46
4.2	Erweiterung des Referenzenergiesystems (RES) mit zellulären Automaten	49
4.2.1	Datenaufnahme und -austausch	51
4.2.2	Bestandes- und Altersklassenzuordnung im Zellraum	52
4.2.3	Flächenbegrenzungen von zellulären Gütern	53
4.2.4	Verknüpfung von Zellen zu Einheitsflächen	54
4.2.5	Anfangsbedingungen und äußere Einflüsse bei zellulären Gütern	57
4.3	Das mathematische Modell NATURE	57
4.3.1	Beschreibung und Vorgehensweise	57
4.3.2	Zeitreihenbasierte Referenzbestände in der Datenbank	58
4.3.3	Diskretes und kapazitives Wachstum zur Abbildung nichtlinearer Trends	60
4.3.4	Dynamisierung der Kohlenstoffbilanzierung in Böden	62
4.3.5	Automatisierung von zellulären Gütern	63
4.4	Schnittstellen zwischen PlaNet und NATURE	66
4.4.1	Modellstruktur und mathematische Modelle	66
4.4.2	Energiespeicher	68
4.4.3	Katastrophen	68
4.4.4	Evolutionäres Lösen durch dynamisch-sequenzielle Zeitreihenanalyse	69
4.5	Energie- und Kohlenstoffbilanzierung in den Modellen	71
4.6	Zusammenfassung	73
5	Energie- und CO₂-Bilanzierung für Dar es Salaam in Tansania	75
5.1	Daten für Dar es Salaam, Tansania	75
5.1.1	Bevölkerungs- und Wirtschaftsentwicklung	75
5.1.2	Energiewirtschaftliche Situation in Tansania	76
5.1.3	Holzeinzugsgebiet in Tansania und Großraum Dar es Salaam	77
5.1.4	Böden und Bestände im Untersuchungsgebiet	78
5.2	Modellierung des Gesamtsystems	80
5.3	Szenarien	80
5.3.1	Das Basisszenario (BAS)	82
5.3.2	Szenario ohne Schutz der Ressourcen (ORS)	84
5.3.3	Szenario mit nachhaltiger Energie- und Forstwirtschaft (NAP)	86
5.4	Ergebnisse der Energie- und CO ₂ -Bilanz der Modellrechnungen	88
5.4.1	Nachfrage nach Endenergieträgern	88
5.4.2	Nachfrage nach Primärenergieträgern	89
5.4.3	Verluste durch Umwandlung und Transport von Primär- zu Endenergieträgern	90
5.4.4	Waldentwicklung und Holznutzung	91
5.4.5	Entwicklung der Emissionen	93
5.4.6	Baselinebetrachtung	95
5.4.7	Sensitivitätsanalyse zum Einfluss des Bevölkerungswachstums auf die Emissionen	97
5.5	Vergleich der Ergebnisse	99

6 Schlussbetrachtung	103
6.1 Zusammenfassung	104
6.2 Ausblick	106
Literaturverzeichnis	109

Abbildungen

Abbildung 2-1: Vorgehensweise bei der Modellbildung	10
Abbildung 3-1: Prinzipieller Aufbau eines RES	14
Abbildung 3-2: Speichergüter und Container im RES	15
Abbildung 3-3: Daten, Modellstruktur und mathematisches Modell.....	22
Abbildung 4-1: RES-Aufbau - Einordnung des Waldsystems in ein Gesamtsystem.....	41
Abbildung 4-2: Struktur von Energie- und Waldsystem.....	42
Abbildung 4-3: Qualitative Aufteilung der Flächen im Gesamtsystem.....	44
Abbildung 4-4: Hierarchische Ebenen im Waldmodell am Beispiel von Tansania.....	47
Abbildung 4-5: Datenaufnahme im Zellraum und numerischer Zuordnung.....	52
Abbildung 4-6: Bestandes- und Altersklassenzuordnung im Zellraum	53
Abbildung 4-7: Zeitliche und räumliche Nachbarschaft	54
Abbildung 4-8: Verknüpfung von Zellen mit den Einheitsflächen.....	55
Abbildung 4-9: Summe der Altersklassen auf der Einheitsfläche eines Bodens	56
Abbildung 4-10: Holzvorrat eines Referenzbestandes mit unterschiedlichen Wachstumskurven	59
Abbildung 4-11: Modellstruktur, Realmodelle und mathematische Modelle.....	67
Abbildung 4-12: Schnittstellen und Systemübergänge im Gesamtsystem.....	69
Abbildung 4-13: Evolutionäres Lösen mit NATURE und PlaNet.....	70
Abbildung 5-1: Miombo Bestände und Großraum Dar es Salaam	78
Abbildung 5-2: Kennzeichen, Rahmenbedingungen und Maßnahmen der Szenarien.....	81
Abbildung 5-3: Marktanteile verschiedener Ofentypen im BAS.....	83
Abbildung 5-4: Marktanteile der Meilertechnologien im BAS.....	84
Abbildung 5-5: Marktanteile verschiedener Ofentypen im ORS.....	85
Abbildung 5-6: Marktanteile der Meilertechnologien im ORS.....	85
Abbildung 5-7: Marktanteile verschiedener Ofentypen im NAP.....	86
Abbildung 5-8: Marktanteile der Meilertechnologien im NAP	87
Abbildung 5-9: Entwicklung der Endenergienachfrage nach Energieträgern.....	88
Abbildung 5-10: Entwicklung der Primärenergienachfrage nach Energieträgern	90
Abbildung 5-11: Verluste durch Umwandlung und Transport von Primär- zu Endenergieträgern	90
Abbildung 5-12: Waldentwicklung im BAS	91
Abbildung 5-13: Waldentwicklung im ORS	92
Abbildung 5-14: Waldentwicklung im NAP	93
Abbildung 5-15: Emissionen aus dem Gesamtsystem (Energie- und Waldsystem)	94
Abbildung 5-16: Kohlenstoffgehalt im Boden des Untersuchungsgebietes	95
Abbildung 5-17: Entwicklung der Emissionen in den Szenarien mit Referenztrend.....	96

Abbildung 5-18: Entwicklung der Emissionen mit unterschiedlichem Bevölkerungswachstum	98
Abbildung 6-1: Möglichkeiten, Grenzen und Erweiterung des Modells.....	103

Tabellen

Tabelle 3-1: Vergleich von Simulationsinstrumenten in der Energiewirtschaft.....	20
Tabelle 4-1: Unterschied zwischen evolutionärem Lösen und Einmal-Lösen.....	71
Tabelle 4-2: Erwärmungspotentiale und berücksichtigte Prozesse im Modell.....	71
Tabelle 5-1: Bevölkerungsentwicklungen von Dar es Salaam	76
Tabelle 5-2: Kraftwerkspark von Tansania im Jahr 2000 /Wamukonja, 2001/	77
Tabelle 5-3: Kohlenstoffgehalte im Boden für das tansanische Untersuchungsgebiet	78
Tabelle 5-4: Baumarten und Vegetation von Miombo-Beständen	79

Abkürzungen

a	Jahr
Ak	Altersklasse (durch Alter, Zuwachs und Volumen gekennzeichnet)
AK0	Altersklasse 0 (Freiflächen mit Jungwuchs)
AKI	Altersklasse I (Jungbestände I)
AKII	Altersklasse II (Jungbestände II)
AKIII	Altersklasse III(Altbestände)
AKIV	Altersklasse IV(Endbestände)
AKV	Altersklasse V(Naturwälder)
BAS-M	Basisszenario mit moderatem Bevölkerungswachstum
BAS-H	Basisszenario mit hohem Bevölkerungswachstum
BAS-T	Basisszenario mit tiefem Bevölkerungswachstum
bzw.	beziehungsweise
CDM	Clean Development Mechanism
CHAPOS	Charcoal Potential in Southern Africa
CH ₄	Methan
CO ₂	Kohlendioxid
CO ₂ eq	Kohlendioxidäquivalente
COP	Conference of the Parties
ET	Emissions Trading
GWP	Global Warming Potential Index
ha	Hektar
IPCC	Intergovernmental Panel of Climate Change
JI	Joint Implementation
km ²	Quadratkilometer
LEAP	Long-range Energy Alternatives Planning System
MESAP	Modular Energy Systems Analysis Planning
Mt	Millionen Tonnen
NAP-M	Szenario mit nachhaltiger Energie- und Forstwirtschaft (nationalem Aktionsplan) und moderatem Bevölkerungswachstum
NAP-H	Szenario mit nachhaltiger Energie- und Forstwirtschaft (nationalem Aktionsplan) und und hohem Bevölkerungswachstum
NAP-T	Szenario mit nachhaltiger Energie- und Forstwirtschaft (nationalem Aktionsplan) und und tiefem Bevölkerungswachstum
N ₂ O	Lachgas, Distickoxid

ORS-M	Szenario ohne Ressourcenschutz mit moderatem Bevölkerungswachstum
ORS-H	Szenario ohne Ressourcenschutz mit hohem Bevölkerungswachstum
ORS-T	Szenario ohne Ressourcenschutz mit tiefem Bevölkerungswachstum
PlaNet	Planning Network
RES	Referenzenergiesystem
SEGS	Solar Electric Generating Systems
t	Tonne
THG	Treibhausgase

Kurzfassung

Die Energie- und Kohlenstoffbilanz wird in vielen Entwicklungsländern maßgeblich durch die Energie- und Forstwirtschaft mitbestimmt. Bislang wurden energie- und forstwirtschaftliche Systeme weitgehend getrennt bilanziert. Beide Systeme sind jedoch eng miteinander verbunden, da Waldholz der wichtigste Energieträger in den meisten Entwicklungsländern ist. Die Verbindung beider Systeme liegt in der Erzeugung, der Bereitstellung und der Nutzung des Energieträgers Holz aus dem Wald. Änderungen des Energiemixes im Energiesystem können unmittelbare Auswirkungen auf die Waldentwicklung und die Kohlenstoffbilanz im Gesamtsystem haben. Änderungen in der Bewirtschaftungsform können ihrerseits die Kohlenstoffbilanz im Energiesystem beeinflussen, wenn beispielsweise fossile Energieträger durch Holz ersetzt werden. Auf Grund dessen ist zur Unterstützung von strategischen CO₂-Minderungsmaßnahmen eine interdisziplinäre energie- und forstwirtschaftliche Planung erforderlich.

Ziel dieser Arbeit ist es, eine Modellierungsmethode zu entwickeln, mit der sich eine systemübergreifende Energie- und Kohlenstoffbilanz (für verschiedene Szenarien) berechnen lässt. Der methodische Ansatz trägt dazu bei, dass die Energie- und Kohlenstoffbilanz von Energie- und Waldsystemen nicht mehr getrennt voneinander berechnet wird, sondern dass Daten und Informationen aus Energie- und Forstwirtschaft in ein gemeinsames Modell (Gesamtmodell) einfließen. Um die unterschiedliche Struktur von Energie- und Waldsystemen über ein gemeinsames Verfahren abzubilden, wird das sogenannte Referenzenergiesystem (RES) methodisch weiterentwickelt. Das RES dient häufig zur vereinfachten Abbildung von Energiesystemen. Auf Grund der Weiterentwicklung können nun auch Waldsysteme über das RES abgebildet werden. Das Zusammenwirken von Waldboden und -bestand sowie Auswirkungen von Eingriffen in das Waldsystem können dargestellt werden. Das ist wichtig, weil diese Aspekte die Kohlenstoffbilanz von Wäldern beeinflussen. Durch die Entwicklung des mathematischen Modells „NATURE“ kann die erweiterte RES-Struktur für Waldsysteme berechnet werden. Systemtechnisch wird die Methode in MESAP (Modulare Energie System Analyse und Planung) umgesetzt.

In einer Fallstudie für die Region Dar es Salaam in Tansania wird das Gesamtsystem anhand von drei Szenarien bilanziert. Jedes Szenario wird mit drei möglichen Bevölkerungsentwicklungen zu neun Fällen kombiniert und berechnet. Am unteren Ende der Bandbreite liegen die CO₂-Emissionen im Jahr 2020 um rund 30% über dem Niveau von 1990. Am oberen Ende der Bandbreite steigen die CO₂-Emissionen im Jahr 2020 um das 1,4-fache gegenüber 1990. Gegenüber dem Jahr 1990 reduzieren sich in keinem Szenario die CO₂-Emissionen, so dass davon auszugehen ist, dass Tansania dem Trend anderer Entwicklungsländer folgt und bei versäumten Maßnahmen in der Energie- und Forstwirtschaft zukünftig eher mehr als weniger CO₂ freisetzen wird.

Abstract

The energy and carbon balance in many developing countries is significantly determined by both the energy and forestry sectors. Until now energy and forest economic systems have been to a large extent considered separately. They are however closely connected with one another because wood is the most important source of energy in the majority of developing countries. The interdependence of these systems lies in the production, supply and use of wood as an energy source from the forests. Changes in the energy mix can have direct effects on forest development and the carbon balance of the overall system. Changes in the management of forest systems can likewise affect the carbon balance in the energy system if, for example, fossil sources of energy are replaced by wood. Therefore interdisciplinary energy and forest planning is necessary in order to support strategic CO₂ reduction measures.

The goal of this work is to develop a modelling method with which a cross-system energy and carbon balance can be calculated for different scenarios. The method contributes to the fact that the energy and carbon balance from energy and forest systems are no longer calculated separately from one another, but rather that information and data from energy and forestry flow into a common model. The so-called reference energy system (RES) has been developed further in order to represent the different structure of energy and forest systems using a common procedure. The RES is frequently used to provide a simplified illustration of energy systems. Based on this development forest systems can now also be represented using the RES. The mutual impacts of forest soils and forest cover as well as the effects of interferences in the forest system can be described. This is important because these aspects affect the carbon balance of forests. The development of the mathematical model „NATURE“ allows the extended RES structure for forest systems to be represented. The method is technically implemented in MESAP (Modular Energy System Analysis and Planning).

In a case study for the region of Dar es Salaam in Tanzania, the overall system is balanced on the basis of three scenarios. Each scenario is combined and calculated with three population trends. Thus there are nine cases. In the most favorable case, the CO₂ emissions in the year 2020 are around 30% above the level of 1990. At the upper end, the CO₂ emissions rise in the year 2020 to almost one and a half times those of 1990. In relation to the year 1990, the CO₂ emissions are not reduced in any scenario. Therefore it can be assumed that Tanzania will follow the trend of other developing countries and will emit rather more than less CO₂ unless measures are taken in the energy and forestry system in the future.

1 Einführung in das Thema

1.1 Problembeschreibung

Auch im 21. Jahrhundert stellen für die Entwicklungsländer eine nachhaltige Energie- und Ernährungsversorgung die wichtigsten Herausforderungen dar. Eine Expansion in Naturräume zur Sicherung der Energie- und Nahrungsversorgung ist in den meisten Entwicklungsländern mittlerweile ausgeschlossen, weil nur noch wenige unberührte Naturräume verfügbar sind, die sich für Wald- und Ackerbau eignen. Eine Entwicklung, wie sie in Mitteleuropa nach der Industrialisierung zu beobachten war, ist hinsichtlich der Energieversorgung bedenklich, da die zusätzliche Verbrennung von fossilen Energieträgern dem wesentlichen Ziel von Kioto widerspricht. Im /Kioto-Protokoll, 1997/ wurde niedergeschrieben, dass die globalen Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2012 zum Bezugszeitpunkt von 1990 um 5,4% gesenkt werden sollen.

Die Entwicklungsländer sind derzeit für ein Viertel der globalen CO₂-Emissionen verantwortlich. Allerdings leben Dreiviertel der Weltbevölkerung in Entwicklungsländern /BMZ, 1999 a/, so dass bei steigendem Lebensstandard aller Wahrscheinlichkeit nach nicht nur der Energiebedarf, sondern auch die Emissionen zunehmen würden. China ist hierfür ein vortreffliches Beispiel. Seit Jahren steigen der Energiebedarf und die Emissionen /World Bank, 2002/. Das Land war bereits im Jahr 2001 mit 11,5% am globalen CO₂-Ausstoß von 24,8 Gt beteiligt /BMWi, 2003/. Einige Experten rechnen mit einer vergleichbaren Entwicklung in anderen Entwicklungsländern und gehen von weltweit tendenziell weiter steigenden Emissionen aus. Der Treibhauseffekt erschwert in anderen Regionen der Erde zusätzlich die Lebensbedingungen.

Der Kontinent, der mit 3,4% /BMWi, 2003/ am wenigsten zur Freisetzung der globalen Treibhausgase beiträgt, jedoch am meisten unter den Folgen des Klimawandels zu leiden hat, ist Afrika /Töpfer, 2000/. Die Klimaerwärmung beschleunigt die Ausdehnung der Trockengebiete und verringert unter anderem auch die Regenerationsfähigkeit von natürlichen Waldressourcen. Das ist deshalb schwerwiegend, weil in Afrika südlich der Sahara der Primärenergiebedarf zu 47% mit Holz gedeckt wird /World Bank, 1998//BMZ, 1999 b/. Viele Entwicklungsländer stillen ihren Energiebedarf sogar zu über 90% mit Holz, wie es das Beispiel von Tansania zeigt /Malimbwi et al., 2001/. Die Waldressourcen können sich durch Übernutzung vielfach nicht mehr regenerieren, was zu Engpässen bei der Holzversorgung und zur Versteppung führt.

Die Übernutzung der Holzressource hat einen weiteren gravierenden Effekt. Sie kann ihrerseits auf zwei Wegen zum Treibhauseffekt beitragen. Zum einen entstehen Treibhausgase über verschiedene Prozessketten vom Einschlag über den Transport bis zur Verbrennung der Biomasse. Werden nicht alle freigesetzten Treibhausgase dieser Prozesskette wieder als Biomasse gebunden, ist ihre CO₂-Bilanz nicht ausgeglichen. Zum anderen wird durch Erosion auf den Freiflächen nicht nur die Wasserhaltekapazität des Bodens verringert, sondern kann der damit einhergehende Humusschwund zusätzliche Emissionen erzeugen. Da die Sonneneinstrahlung

auf offenen Flächen direkt auf den Boden trifft, ist das Mikroklima des Bodens in der Regel wärmer als in tropischen und subtropischen Wäldern der gleichen Region. Durch steigende Temperatur werden die Umsetzungsprozesse durch Mikroorganismen im obersten Bodenhorizont zusätzlich angeregt. Der Kohlenstoffvorrat im Boden von tropischen Wäldern variiert zwischen 5.000 und 30.000 t pro km² /Sombroeck et al., 1999/. Aus den genannten Gründen besteht nach Kahlschlag ein enormes CO₂-Freisetzungspotenzial.

1.2 Spannungsfeld der Interessen als Problemursache

Viele Menschen in afrikanischen und anderen Entwicklungsländern haben weder Zugang an ein Strom- noch an ein Gasnetz, weil Planung, Konstruktion und Wartung der Strom- und Gasversorgung häufig nicht finanzierbar sind. Hinzu kommt, dass die breite Bevölkerung Vorbehalte gegenüber modernen Technologien hat, so dass die traditionelle Energieversorgung mit Holz anhält /Jambiya, 2001/. Zusätzliche Konflikte bestehen zwischen Stadt- und Landbevölkerung, weil Holz oft die einzig verfügbare Energieressource in ländlichen Regionen ist, die jedoch in die Städte transportiert und verkauft wird. Die Landbevölkerung sieht sich häufig gezwungen weiterzuziehen. Ohne nachhaltige Umstrukturierung der städtischen Energieversorgung können die Waldrodungen nicht verringert werden, wie Modellergebnisse von /Frey, Neubauer, 2002/ für das südliche Afrika belegen. Fehlendes nachhaltiges Energiemanagement in den Städten und unkontrollierte Waldnutzung verschärfen den Interessenkonflikt um die knappe Ressource Holz einer Region.

Einige Industrieländer befinden sich in einem eigenen Zielkonflikt, weil eine Förderung der Energiewirtschaft in Entwicklungsländern mit der Forderung nach sinkenden Emissionen schwierig zu erreichen und vor allem teuer ist. Viele Entwicklungsländer sind nicht bereit, in Klimaschutzmaßnahmen zu investieren, weil ihnen das Klimaschutzziel zu abstrakt und westlich geprägt ist. Sie sehen sich durch eine Verpflichtung zur Treibhausgasreduktion in ihren Möglichkeiten zum Wirtschaftswachstum „ausgebremst“ /World Bank, 2002/. Währenddessen streiten die Industrienationen untereinander, ob Wälder überhaupt einen Beitrag zur Treibhausgasreduktion leisten können und welche Rolle den tropischen Wäldern im globalen Kohlenstoffhaushalt zukommt.

Um diese Konflikte zu entschärfen und um eine gemeinsame Brücke zu bauen, spielt die rechtzeitige Einbeziehung von Entwicklungsländern in die Bemühungen um eine Reduktion der Treibhausgase eine wichtige Rolle.

Eine Möglichkeit, die Entwicklungsländer in die Klimaschutzbemühungen mit einzubeziehen, ist der sogenannte Clean Development Mechanism (CDM). Der CDM ist einer von drei Kioto-Mechanismen und beschreibt das Zusammenwirken von Industrie- und Entwicklungsländern hinsichtlich gemeinsamer Projektdurchführungen zur CO₂-Reduktion. Er soll entwicklungspolitischen Nutzen stiften, die nachhaltige Entwicklung fördern sowie einen Know-How- und Technologietransfer von Nord nach Süd ermöglichen beziehungsweise erleichtern. Man

erhofft sich, dass zusätzliche Investitionsmittel in die Entwicklungsländer fließen.

Projekte, die mit Geldern der Entwicklungshilfe finanziert sind, dürfen nicht als Emissionsminderungsmaßnahmen angerechnet werden - wohl, um einer Zweckentfremdung vorzubeugen. Ob zusätzliche Finanzmittel aus ausländischen Direktinvestitionen oder privaten Bankkrediten in die Entwicklungsländer fließen, hängt wesentlich davon ab, ob die tatsächlich mögliche Gutschrift für einzelne Projektmaßnahmen bekannt ist. Die Gutschriften basieren wiederum auf den zusätzlich reduzierten Treibhausgasen durch Klimaschutzmaßnahmen. Um Emissionsminderungsmaßnahmen in Entwicklungsländern bewerten zu können, sind jedoch zunächst geeignete Methoden erforderlich, um die Emissionsbilanzen zu bestimmen.

1.3 Problemanalyse im Rahmen von Energie- und Kohlenstoffbilanzen

Der folgende Abschnitt konzentriert sich auf die Analyse der Probleme, die bei einer Energie- und Kohlenstoffbilanzierung von Energie- und Waldsystemen bestehen. Die Abhängigkeit beider Systeme liegt in der Erzeugung, der Bereitstellung und der Nutzung des Energieträgers Holz. Eine grundsätzliche Frage ist, wie energiebedingte Emissionen in beiden Systemen berechnet werden können und wie sich ihre Bilanz unter verschiedenen Rahmenbedingungen und der Durchführung unterschiedlicher Maßnahmen verändern kann. Die Entwicklung geeigneter methodischer Ansätze für die Energie- und Kohlenstoffbilanzierung in Entwicklungsländern wird durch folgende Faktoren erschwert:

- Es handelt sich um zusammenhängende, komplexe Systeme
- Es gibt zahlreiche interdisziplinäre Schnittstellen
- Es liegt ein Mangel an Methoden und eine unzureichende Datenlage vor
- Die Systemgrenzen von Energie- und Waldsystem sind sehr unterschiedlich

Energie- und Waldsysteme sind bereits für sich betrachtet sehr komplex und unterschiedlich. Vor allem die vereinfachte Abbildung von Waldsystemen bereitet mannigfache Schwierigkeiten, da unterschiedliche Nutzungsarten das jährliche Wachstum und damit die Energie- und Kohlenstoffbilanz des Wald- und Bodensystems stark verändern können. Das genaue Wachstumsverhalten von Beständen auf verschiedenen Böden mit unterschiedlichen Nutzungen ist in vielen Entwicklungsländern wenig erforscht /Veldkamp, 2001/. Waldwachstumsmodelle waren lange Zeit darauf ausgerichtet, Aussagen über die zukünftige Holzproduktion auf bestimmten Standorten zu liefern. Aspekte der Kohlenstoffbilanzierung fehlen häufig.

Da Energie- und Waldsysteme normalerweise von unterschiedlichen Forschungseinrichtungen analysiert werden, fehlt es vielfach an der interdisziplinären Zusammenarbeit, um die Schnittstellen zu definieren. Zudem ist die Datenlage für eine Modellbildung häufig unzureichend, so dass Daten aus vergleichbaren Regionen herangezogen werden müssen. Möchte man

die quantitativ bedeutsamsten Treibhausgase CO_2 , CH_4 und N_2O bilanzieren, ergeben sich zusätzliche Schwierigkeiten hinsichtlich der Datenbeschaffung in jedem einzelnen System.

Eine gemeinsame Abbildung von Energie- und Waldsystemen kann in vielen Entwicklungsländern sinnvoll sein, da sie wesentlich enger zusammenhängen als in den Industrienationen. Das liegt, wie bereits angesprochen, daran, dass viele Städte in Entwicklungsländern nach wie vor zu den Hauptverbrauchern von Holzprodukten gehören und damit die Waldentwicklung in den ländlichen Gebieten maßgeblich beeinflussen. Dadurch entstehen massive Wechselwirkungen von Holznachfrage und Holzangebot in einer Region. Sind die Holzressourcen der eigenen Region erschöpft, gibt es kurzfristig zwei Möglichkeiten, die Energieversorgung der Städte zu sichern: Holz aus anderen Regionen zu beziehen sowie verstärkt auf andere Energieträger umzusteigen. Aufforstungsplanungen eignen sich auf Grund der langen Holzproduktionszeiträume lediglich als mittel- und langfristige Maßnahmen.

Beide Systeme haben sehr unterschiedliche Systemgrenzen. In der Forstwirtschaft sind diese Grenzen vor allem von den Wachstumsbedingungen, der technischen Nutzung, der Wirtschaftlichkeit und der zur Verfügung stehenden Fläche abhängig. In der Energiewirtschaft spielen vor allem technische, wirtschaftliche sowie umweltrelevante Systemgrenzen eine Schlüsselrolle. Die zeitlichen Systemgrenzen sind in der Forstwirtschaft durch lange Produktionszeiträume gekennzeichnet, die der Energiewirtschaft durch eine lange Nutzungsdauer von Kraftwerken, was die Bilanzierungszeit beeinflusst. Eine gemeinsame geographische Grenze lässt sich beispielsweise regional ziehen.

Um die Auswirkungen von Minderungsmaßnahmen eines Systems zu berechnen, sind die Folgen für beide Systeme zu berücksichtigen. Beispielsweise können Aufforstungsprojekte mehrere Zwecke verfolgen: Kohlenstoffspeicherung, Energieholzerzeugung oder Produktion von Wertholz. Jeder Zweck hat entsprechende Konsequenzen für beide Systeme mit ihrer Kohlenstoffbilanz. Bei reiner Speicherhaltung würde der Energieträger Holz in den Städten durch andere Energieträger substituiert, die entsprechende Emissionen freisetzen. Die Holzspeicherhaltung wäre vorteilhaft, wenn die Emissionen des Substituts geringer sind, als durch den Wald gebunden werden kann. Mit dieser Maßnahme ist der gleichzeitig geforderte Walderhalt verbunden. Für eine nachhaltige Energieversorgung müssten sich jedoch zusätzliche Maßnahmen im Energie- und Waldsystem anschließen.

1.4 Aufbau der Arbeit

Auf Basis der beschriebenen Problematik werden in Kapitel 2 die Zielsetzung und die Vorgehensweise dargestellt.

Da sich die Arbeit mit verschiedenen Systemen auseinandersetzt, werden in Kapitel 3 systemwissenschaftliche Erläuterungen vorgestellt. Es werden Methoden zur Energie- und Kohlenstoffbilanzierung in Energie- und Waldsystemen diskutiert. Hierbei wird erklärt, welche Modellkategorie eingesetzt werden soll. Energie- und Waldmodelle sowie die bisherige Be-

stimmung des Kohlenstoffhaushalts in Wald- und Bodentypen werden beschrieben. Das Kapitel schließt mit der Begründung, warum die bisherigen Bilanzierungsmethoden nicht ausreichen, um eine systemübergreifende Energie- und Kohlenstoffbilanzierung durchzuführen.

In Kapitel 4 wird die neue Methode vorgestellt. Zunächst erfolgt eine Festlegung der Anforderungen und Systemgrenzen sowie der Modellstruktur. Darauf aufbauend wird die Entwicklung der Methode in ihren Einzelschritten beschrieben und mathematisch formuliert. Es entsteht ein mathematisches Modell zur Berechnung von Kohlenstoffvorräten in Wäldern, das mit einem Energiesystem aus Kapitel 3 gekoppelt wird. Dadurch lassen sich Wechselwirkungen beider Systeme realitätsnäher abbilden als mit einer getrennten Modellierung. Methodisch entsteht ein aggregiertes Modell, das den CO₂-Kreislauf anhand von Wachstumsvorgängen über die Bereitstellung bis zum Verbrauch von Energieträgern abbilden kann. Die Modellierung beider Systeme wird methodisch so aufgebaut, dass die Modelle sowohl alleine als auch gekoppelt berechenbar sind.

In Kapitel 5 werden die Ergebnisse einer Fallstudie dargestellt. Sie basiert auf der Datengrundlage des CHAPOSA-Projektes (Charcoal Potential in Southern Africa) im südlichen Afrika. Zunächst gibt das Kapitel einen Überblick zur Datenlage. Anschließend werden drei Szenarien zur CO₂-Entwicklung durchgespielt. Ein Vergleich der Modellergebnisse schließt das Kapitel ab.

Kapitel 6 enthält eine Schlussbetrachtung zur Methode und der Fallstudie. Möglichkeiten, Grenzen und weitere Erfordernisse für eine Modellierung der Energie- und Kohlenstoffbilanzierung werden dargelegt. Eine wirtschaftspolitische Einschätzung rundet die Arbeit ab.

2 Zielsetzung

Zielsetzung der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung einer Methode zur integrierten Energie- und Kohlenstoffbilanzierung von Energie- und Waldsystemen. Mit Hilfe eines Modells sollen mögliche Entwicklungen der Energie- und Kohlenstoffbilanzen im Energie- und Waldsystem analysiert werden. Im Energiesystem sollen alle Sektoren modelliert werden, die für die Waldentwicklung eine wesentliche Rolle spielen können, da sich durch eine Veränderung des Energiemixes die Kohlenstoffbilanz im Gesamtsystem erheblich verändern kann. Der Verkehrssektor wird nicht betrachtet, da keine direkten Wechselwirkungen mit dem Holzverbrauch bestehen.

Über evolutionäres Lösen von Modellperiode zu Modellperiode in der Modellierungszeit sollen sich die Auswirkungen von Holznutzungen und Naturkatastrophen auf die Kohlenstoffbilanz modellieren lassen. Dadurch soll sich das Waldsystem dynamischer und damit realitätsnäher modellieren lassen als es mit bisherigen Verfahren möglich ist.

Um eine systemübergreifende Modellbildung zu ermöglichen, soll eine geeignete Basis zur vereinfachten Abbildung der Realität gefunden werden. Die Modellanforderungen werden folgendermaßen formuliert und anschließend näher beschrieben:

- Abbildung der Realität über das Referenzenergiesystem (RES)
- Strukturierung einer systemübergreifenden Modellierungsmethode
- Weiterentwicklung des RES zur Abbildung dynamischer Prozesse im Waldsystem
- Entwicklung eines mathematischen Waldmodells zur Kohlenstoffbilanzierung
- logische Kopplung von RES und den mathematischen Modellen
- Berechnung der Dynamik von Kohlenstoffveränderungen in Waldsystemen

Zur vereinfachten Abbildung der Realität bietet sich eine einheitliche Grundstruktur im Gesamtmodell an. Diese Grundstruktur soll über ein RES aufgebaut werden, so dass Energie- und Waldmodell über Stoffströme miteinander verbunden sind. Die Kohlenstoffbilanzierung soll sowohl für das Gesamtsystem als auch für das Energie- und Waldsystem getrennt möglich sein. Es soll geprüft werden, ob die Summe einer getrennten Bilanz von Energie- und Waldsystem gleich der Summe einer Gesamtbilanzierung ist.

Im Rahmen der Modellierung des Waldsystems soll geprüft werden, ob und gegebenenfalls wie das RES weiterentwickelt werden muss, um Waldsysteme möglichst realitätsnah abbilden zu können. Das Waldmodell soll Wachstums- und Zerfallsprozesse von Waldbeständen und Böden mit ihren Wechselwirkungen berücksichtigen. Des weiteren soll es unterschiedliche topographische Ebenen abbilden, weil unterschiedliche Höhenlagen spezifische Wachstumsbedingungen haben. Einflüsse auf die Kohlenstoffbilanz durch menschliche Eingriffe sowie Na-

turkatastrophen sollen im Waldmodell berechnet werden können, weil sich durch Eingriffe das Wachstumsverhalten des Bestandes verändert. Zudem soll es möglich sein, jeden beliebigen Bestand in die Datenbank des Modells einzuspeisen. Informationen und Daten zu Beständen und Böden sollen ohne Programmierung in das RES integriert werden können.

Auf Grundlage der einheitlichen RES-Struktur sollen Energie- und Waldsysteme als eigenständige Submodelle definiert werden. Das RES für beide Systeme soll sich logisch trennen lassen. Dies soll durch klar definierte Schnittstellen gewährleistet werden. Die Schnittstellen sollen über eine gemeinsame Schnittmenge im RES von Energie- und Waldmodell abgebildet werden können. Durch die einheitliche Abbildung des Gesamtsystems über das RES soll eine strukturierte Modellierungsmethode geschaffen und die systemübergreifende Modellierung für den Anwender erleichtert werden.

Das RES soll sich mit jeweils adäquaten mathematischen Modellen verknüpfen lassen. Die Energie- und Kohlenstoffbilanzierung im Energiesystem soll mit einer gängigen mathematischen Methode simuliert werden. Die eingesetzte Methode soll frei definierbare Szenarioberechnungen erlauben.

Im Zuge einer Analyse des RES zur Abbildung des Waldsystems soll geprüft werden, wie ein mathematisches Modell zur Berechnung der Energie- und Kohlenstoffbilanz konzipiert sein muss. Die Dynamik der Kohlenstoffbilanz im Waldsystem soll über das eingesetzte mathematische Modell berechnet werden können. Die Kohlenstoffbilanzierung für den Wald soll im Vergleich zu vorhandenen Methoden realitätsnäher sein. Im mathematischen Waldmodell soll die gleiche Szenariotechnik wie im Energiemodell eingesetzt werden, um eine einheitliche Strukturierung der Modellergebnisse in beiden Systemen zu gewährleisten.

Das Bilanzierungsmodell soll einen geographisch begrenzten Raum abbilden, da sowohl das Wald- als auch das Energiesystem Land beanspruchen. Das Energiesystem soll sich durch die Flächen von Städten und Dörfern abgrenzen. Das Landsystem soll sich aus Agrar- und Waldland zusammensetzen. Das Energiemodell soll veränderliche Flächenanteile von Städten und Dörfern einer Region berücksichtigen können. Die Flächenanteile des Waldmodells sollen sich nach der Flächenänderung im Energiemodell richten, da beispielsweise durch Städtebau die Agrar- und Waldflächen zurückgedrängt werden. Die geographischen Systemgrenzen sollen den gegenwärtigen politischen Grenzen von Regionen entsprechen, so dass die Gesamtfläche im Modellierungszeitraum gleich groß bleibt. Dadurch ergeben sich Restriktionen hinsichtlich der Verfügbarkeit natürlicher Ressourcen in der Region. Es soll eine Vergleichbarkeit der Entwicklung der Energie- und Kohlenstoffbilanz mit Bezug auf eine fixe Flächengröße gewährleistet werden. Stoffströme im System und solche, die in das System hinein oder heraus fließen, sollen quantifizierbar sein.

Im Rahmen einer Fallstudie für eine Region in Tansania soll die praktische Anwendung der Methode erfolgen. Aufbauend auf dem CHAPOSA-Projekt in einer tansanischen Region soll die Energie- und Kohlenstoffbilanz für verschiedene Rahmenbedingungen untersucht werden. In der Fallstudie sollen drei Szenarien entworfen werden. Das Basisszenario soll die

erkennbaren Trends aus der Vergangenheit fortführen. Als weiteres soll ein Szenario ohne Ressourcenschutz modelliert werden. Es soll zeigen, wie sich die Energie- und Kohlenstoffbilanz unter ungünstigen Rahmenbedingungen entwickeln könnte. Das dritte Szenario mit nachhaltiger Energie- und Forstwirtschaft soll auf der Basis eines sogenannten nationalen Aktionsplans modelliert werden. Es soll die Auswirkungen auf die Energie- und Kohlenstoffbilanz durch den Einsatz von vielfältigen nachhaltigen Maßnahmen im Energie- und Waldsystem zeigen.

Die treibende Größe im Haushaltsenergiesektor soll die Bevölkerungsentwicklung sein, da der Holzenergieverbrauch wesentlich von dieser Eingangsvariablen (Parameter) abhängt. Für den Dienstleistungssektor sowie den Industrie- und Gewerbesektor soll das Bruttoinlandsprodukt als exogene Eingangsvariable vorgegeben werden, da für diese Sektoren die wirtschaftliche Entwicklung entscheidend ist. In die Kohlenstoffbilanz sollen CO_2 , CH_4 und N_2O als CO_2 -Äquivalente eingehen, da sie quantitativ zu den drei wichtigsten Treibhausgasen gehören und zu den sechs Kioto-Gasen zählen, die für den Klimawandel mitverantwortlich gemacht werden. Die anderen drei Treibhausgase (H-FKW, FKW sowie SF_6) sollen nicht berücksichtigt werden, da ihr Erwärmungspotenzial nur in Bandbreiten abgeschätzt werden kann und dadurch die Unsicherheiten bei der Berechnung der Emissionen erhöhen würden.

Ziel der Fallstudie ist es, Erkenntnisse über die Energie- und Kohlenstoffbilanz im untersuchten Gesamtsystem zu erhalten und die Methode zu evaluieren. Die Ergebnisse der Fallstudie sollen dazu beitragen, systemübergreifende Lösungen für eine nachhaltige Energie- und Forstwirtschaft unter Berücksichtigung der Emissionen von Entwicklungsländern aufzuzeigen. Die Emissionsentwicklungen sollen unter den drei zuvor beschriebenen Szenarien berechnet und miteinander verglichen werden.

Vorgehensweise bei der Modellbildung

Die Vorgehensweise der Modellbildung ist in Anlehnung an /Schlenzig, 1998/ und /Voß, 2002/ in Abbildung 2-1 zusammengefasst. Die einzelnen Schritte werden in den nachfolgenden Kapiteln beschrieben. Sowohl Modellbildung als auch Entscheidungsfindung sind iterative Prozesse, die mit einer Validierung der einzelnen Schritte einhergehen. Für zufriedenstellende Ergebnisse müssen die Schritte mehrfach durchlaufen werden.

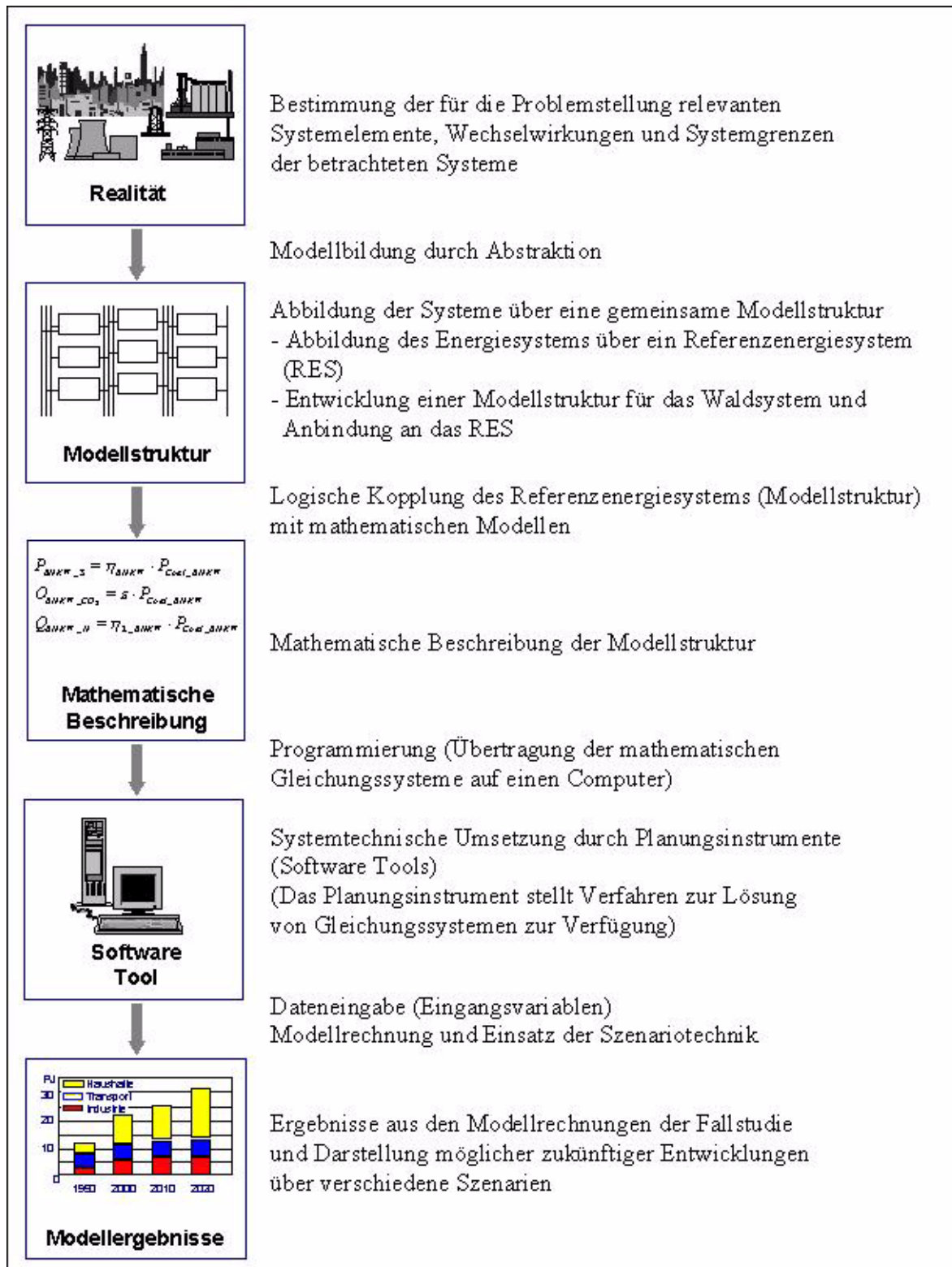


Abbildung 2-1: Vorgehensweise bei der Modellbildung

3 Methoden für die Energie- und Kohlenstoffbilanzierung

In diesem Kapitel werden Methoden für die Energie- und Kohlenstoffbilanzierung in Energie- und Waldsystemen dargelegt. Die Systemwissenschaft wird in Kapitel 3.1 erläutert, da Systeme eine Schlüsselrolle der vorliegenden Arbeit einnehmen. Modellsysteme zur Energie- und Kohlenstoffbilanzierung werden in Kapitel 3.2 diskutiert. In Kapitel 3.3 wird das Energieplanungsinstrument MESAP und das Simulationsmodul PlaNet besprochen. Kapitel 3.4 beschäftigt sich mit der Waldmodellierung als Grundlage einer Kohlenstoffbilanzierung in Waldbeständen. Es gibt einen Einblick in bisherige Methoden zur Quantifizierung von Kohlenstoff in Wäldern. Zudem werden die Möglichkeiten zur Bilanzierung von Kohlenstoff in Böden dargestellt. Kapitel 3.5 enthält eine Darstellung der Systems-Dynamics-Methode zur Analyse von Energie- und Umweltsystemen. Kapitel 3.6 stellt die Modellbildung mit zellulären Automaten vor. In Kapitel 3.7 wird die Notwendigkeit einer integrierten Energie- und CO₂-Bilanzierung erläutert.

3.1 Systemwissenschaft

Die Systemwissenschaft ist interdisziplinär ausgerichtet und kann in drei Bereiche unterteilt werden /Voß, 2002/. Sie besteht aus Systemtheorie und -forschung, der Analyse von Systemen und der Systemtechnik. Diese drei Bereiche werden in den folgenden Abschnitten erläutert, da die Systembetrachtung eine zentrale Bedeutung für die vorliegende Arbeit hat.

Systemtheorie und Systemforschung

Die allgemeine Systemtheorie wurde von Bertalanffy bereits 1945 geprägt /Bertalanffy, 1968/. Sie ist als Reaktion auf die isolierte wissenschaftliche Betrachtungsweise entstanden und erhielt wesentliche Bedeutung seit der ersten Ölkrise Anfang der 1970er Jahre.

Der Begriff System entstammt dem griechischen Wort „sýstēma“ beziehungsweise „σύστημα“ und bedeutet Zusammenstellung. Mit Zusammenstellung ist eine Auswahl der zu berücksichtigenden Systemelemente verbunden. Objektivität erreicht diese Wahrnehmung durch das Zusammenführen möglichst gesicherter Erkenntnisse über das System. Erforderliche Kenntnisse über den Realitätsausschnitt werden gesammelt und dokumentiert. Erkenntnislücken werden in dieser systemischen Betrachtung wissenschaftlich ausgefüllt. Die Systemtheorie beschäftigt sich daher im Vorfeld der Systemforschung mit theoretischen kausalen Zusammenhängen für den relevanten Realitätsausschnitt. Die Abbildung des realen Systems wird auf die zu untersuchenden Fragestellungen zugespitzt.

In der Systemforschung ist ein System ein in zielgerichteter Weise abgegrenzter Teil aus einem Gesamtzusammenhang. Die Systemforschung betrachtet die Wechselwirkung von Dingen und Vorgängen im System /Kleemann, 2002/. Der /VDI, 1996/ definiert ein System als abgegrenzte Anordnung von miteinander in Verbindung stehenden Komponenten. Komponenten

werden in Elemente und Subsysteme unterteilt. Subsysteme stellen bei Erhöhung der Auflösung wiederum Systeme dar. Elemente sind hingegen nicht weiter zerlegbar /VDI, 1996/.

Bei einer systemischen Betrachtung wird versucht, Interdependenzen von Systemkomponenten zu berücksichtigen. Sind sowohl die Teile eines Systems als auch deren Relationen zueinander bekannt, so ist das Verhalten des Systems abhängig vom Verhalten seiner Teile mit allen möglichen Interdependenzen /Schmaltschinski, 1998/. Kräfte, die zwischen den Komponenten eines Systems wirken, lassen sich nicht einfach aufaddieren. Aus der Kenntnis von Teilen eines Systems kann daher nicht auf das Gesamtsystem geschlossen werden. Dem entsprechend sind Gesetze und Regeln überall dort nicht linear, wo das ganze System mehr ist als die Summe seiner Teile /Gerhard, Schuster, 1995/.

Anders ausgedrückt besteht ein System aus einer Menge von Elementen p , die in Wechselwirkung R zueinander stehen. Zwei verschiedene Wechselwirkungen R und R' führen zu unterschiedlichen Reaktionen der Elemente p . Falls die Elemente p keine unterschiedlichen Reaktionen aufweisen, bestehen keine Wechselwirkungen, und die Elemente p sind unabhängig von R und R' /Schmaltschinski, 1998/.

Lange herrschte in der Wissenschaft die Meinung, dass der Verlauf jedes dynamischen Systems exakt vorausgesagt werden könnte, wenn sein Zustand und seine Gesetzmäßigkeiten genau bekannt wären. Auf diese Weise könnte man dynamische Systeme mit Differentialgleichungen beschreiben. Das Verhalten des Systems wäre vorausbestimmbar, wenn alle Gleichungen und die Zustände bekannt wären. Diese Vorgehensweise bei der Abbildung von Systemen ist rein deterministisch.

Völlig anders hingegen verhalten sich nicht-deterministisch oder stochastisch abgebildete Systeme. Die gleichen Anfangsbedingungen können zu verschiedenen Zeitpunkten zu unterschiedlichem Verhalten führen. Gleichungen, die stochastische Systeme beschreiben, enthalten Zufallsvariablen. Diese Zufallsvariablen sorgen für ein sogenanntes Chaos, da zufällig bestimmt wird, wie sich die Abläufe im System verändern. Die genaue Entwicklung eines chaotischen Systems ist daher nicht voraussagbar. Ein typisches Beispiel ist Feuer in Waldsystemen.

In der Systemwissenschaft unterscheidet man zwischen deterministischen und chaotischen (stochastischen) Abbildungen von Systemen. Es gibt allerdings Modelle, bei denen beide Abbildungen integriert werden müssen, um die Realität hinreichend abbilden zu können. So lässt sich das Wachstum von Waldbeständen anhand von vergleichbaren Beständen voraussagen. Feuer kann hingegen diese determinierte Wachstumsdynamik stark beeinflussen, so dass ab diesem Zeitpunkt andere Wachstumskurven zu erwarten sind.

Technische Systeme, welche die Menschen mit Energie versorgen, werden allgemein als Energiesysteme bezeichnet. Natursysteme, welche die Menschen mit Holz versorgen können, gehören zu den Waldsystemen. Energie- und Waldsysteme sind in der Regel offene Systeme. Sie sind mit Gesamtwirtschaft, Umwelt und Gesellschaft verbunden.

Besondere Bedeutung haben in der Energie- und Forstwirtschaft die dynamischen Systeme

me. Ein dynamisches System durchläuft in einer zeitlichen Abfolge eine Reihe von Zuständen. Bei einem diskreten dynamischen System sind die Zustände zu bestimmten periodischen Zeitpunkten definiert.

Systemanalyse und Systemgrenzen

Die Systemanalyse ist eine rein beschreibende Untersuchung von Systemen im gegenwärtigen Zustand. Ihre Erkenntnisse bauen auf der Systemtheorie und -forschung auf und zeigen gleichzeitig den weiteren Forschungsbedarf /Voß, 2002/. Im Rahmen der Systemanalyse wird die Struktur des Systems aufgestellt.

Die Analyse eines betrachteten Realitätsausschnitts erfordert es, klare Systemgrenzen zu ziehen und zu beschreiben. Die Systemgrenzen richten sich nach dem, was man über das System herausfinden möchte. Mit den Systemgrenzen sollen alle wichtigen Teile des Systems eingeschlossen werden, die für die Untersuchung interessant und relevant sind. Von der Fragestellung unberührte Teile des Systems lassen sich gleichzeitig ausgrenzen, wenn sie keinen Einfluss auf die zu untersuchenden Teile des Systems ausüben. Die präzise Festlegung von Systemgrenzen ist zudem Voraussetzung für mathematische Berechnungen des betrachteten Realitätsausschnitts.

Mit den Systemgrenzen sind die Grenzen des Systems gegenüber seiner Umwelt festgelegt, mit der es in Wechselwirkung stehen kann. Mit seiner Umwelt ist das System über Schnittstellen zum Austausch von Materie, Energie und Informationen verbunden /VDI, 1996/.

Systemtechnik und Vernetzung in Energiesystemen

Die Systemtechnik setzt die Erkenntnisse und Methoden aus Systemtheorie und -forschung in meist computerbasierte Planungswerkzeuge um. Die Systemtechnik stellt damit den Übergang zur praktischen Planung dar. Sie setzt die Systemanalyse voraus, um das geeignete Planungsinstrument einsetzen zu können.

Die Struktur eines Energiesystems wird durch die Art und Anzahl der Elemente sowie deren Verknüpfungen gebildet /Kleemann, 2002/. Durch Verknüpfung von Prozessen und Gütern in einem Netzwerk kann die Energie- und Kohlenstoffbilanz entsprechend den Erfordernissen abgebildet werden. Die Vorgehensweise ist entweder eine sogenannte Top-Down- oder eine Bottom Up-Modellierung. Bei der Top-Down-Modellierung wird das Gesamtsystem in immer kleinere Netzwerke zerlegt. Somit kann ein komplexes Energiesystem mit der Top-Down-Methode immer weiter verfeinert werden /Wirt, 1972/. Die Bottom-Up-Modellierung aggregiert hingegen aus den Elementen einzelne Netzwerke, bis sie auf das zu betrachtende Gesamtsystem skaliert worden sind. /Blesl et al., 1998/ bezeichnen die Bottom-Up-Methode als Umkehrung der Top-Down-Methode. Die unterste Basisschicht ist der Ausgangspunkt, um danach die Basiselemente mit Hilfe von Strukturierungselementen zusammenzufassen.

Die in einem Energiesystem enthaltenen Güter werden über sogenannte Energieumwand-

lungsketten verknüpft. Am Anfang von vollständigen Energieumwandlungsketten stehen die naturgegebenen Energierohstoffe als Quellen /Kleemann, 2002/. Mit Hilfe von Gewinnungstechnologien werden sie als Primärenergieträger bereitgestellt. Da Primärenergieträger häufig für eine direkte energetische Nutzung ungeeignet sind, werden sie in Sekundärenergieträger umgewandelt. Daran können sich weitere Umwandlungsstufen anschließen. Danach werden sie vom Ort der Erzeugung zum Endverbraucher transportiert. Die beim Endverbraucher vorliegende Energie wird als Endenergie bezeichnet /Voß, 1999/.

In realen Energiesystemen können vielfältige Umwandlungsketten durch Verzweigung und Vereinigung der Energieflüsse miteinander vernetzt sein. Zur Verbesserung der Übersichtlichkeit und Verringerung des Datenaufwands werden ähnliche Systemelemente zu repräsentativen Modellelementen zusammengefasst /Kleemann, 2002/. In einigen Planungsinstrumenten sind Netzwerktechniken zur Darstellung der Realität für die Energie- und Umweltmodellierung eingebaut.

Referenzenergiesystem

Ein solches Netzwerk stellt das Referenzenergiesystem (RES) von /Beller, 1975/ dar. Das RES bildet die Realität vereinfacht ab und enthält Prozesse, Güter und Flüsse. Prozesse können ein oder mehrere Güter in andere Güter umwandeln. Güter summieren alle mengenmäßig erfassbaren Stoffströme und Größen /Schlenzig, 1998/. Güter und Prozesse sind über Flüsse miteinander verknüpft. Dadurch wird im einfachsten Fall ein Gut durch einen Prozess in ein anderes Gut umgewandelt. Abbildung 3-1 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines RES. Im Kohlekraftwerk wird Kohle in Elektrizität, Wärme und CO₂ umgewandelt (sowie weitere Stoffe, die in dieser vereinfachten Abbildung ungenannt bleiben).

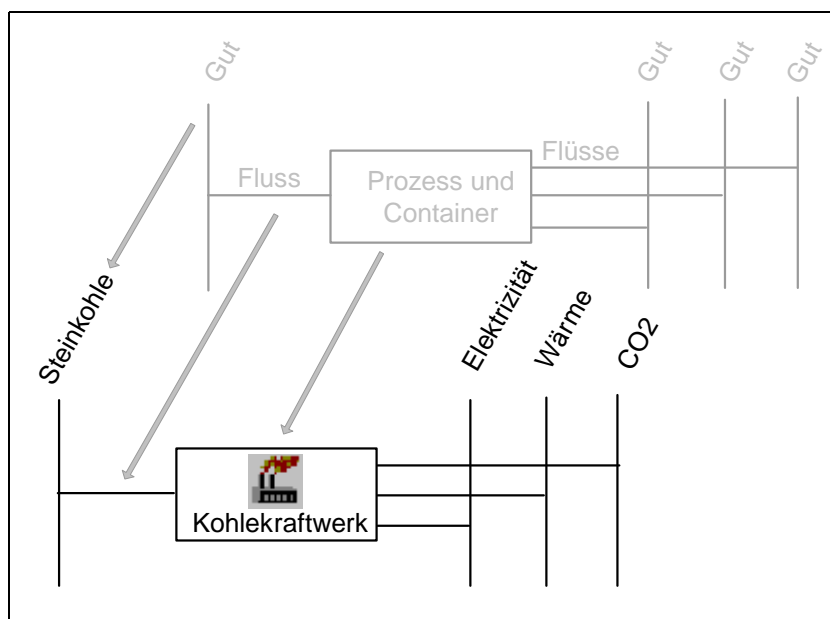


Abbildung 3-1: Prinzipieller Aufbau eines RES

Um eine Untergliederung des Kohlekraftwerks vorzunehmen, ist eine topologische Strukturierungsmöglichkeit im RES sinnvoll. Dies wurde im Rahmen einer Weiterentwicklung des RES durch /Blesl et al., 1998/ und /Stuible, 2002/ ermöglicht. Neben Prozessen und Gütern können sogenannte Container und Speichergüter eingebaut werden.

Container dienen zur Untergliederung der RES-Struktur und können nach Regionen, Sektoren, Technologien und weiteren frei definierbaren Bezeichnungen hierarchisch untergliedert werden /Blesl et al., 1998/, /Stuible, 2002/. Speichergüter enthalten in der jeweiligen Modellperiode die Differenz aus Zu- und Abflüssen von Gütern. Speicherverluste werden durch den Speicherwirkungsgrad η berücksichtigt /Weber et al., 1997/, /Weinmann, 1999/. In Gleichung (3-2) ist die Berechnung des Speichers Q_{Sp} zum Zeitpunkt t formuliert.

$$Q_{Sp}(t) = \eta(t) \cdot Q_{Sp}(t-1) + \sum_{\text{Zuflüsse } i} qflow_i(t) - \sum_{\text{Abflüsse } j} qflow_j(t) \quad (3-1)$$

In Abbildung 3-2 ist ein Speicher in Form eines Holzkohlespeichers in das RES eingebunden. Aus dem Container mit verschiedenen Meilertechnologien wird Holzkohle in den Speicher transportiert. Bei entsprechender Nachfrage durch die Verbraucher im Haushaltssektor fließt Holzkohle aus dem Speicher ab.

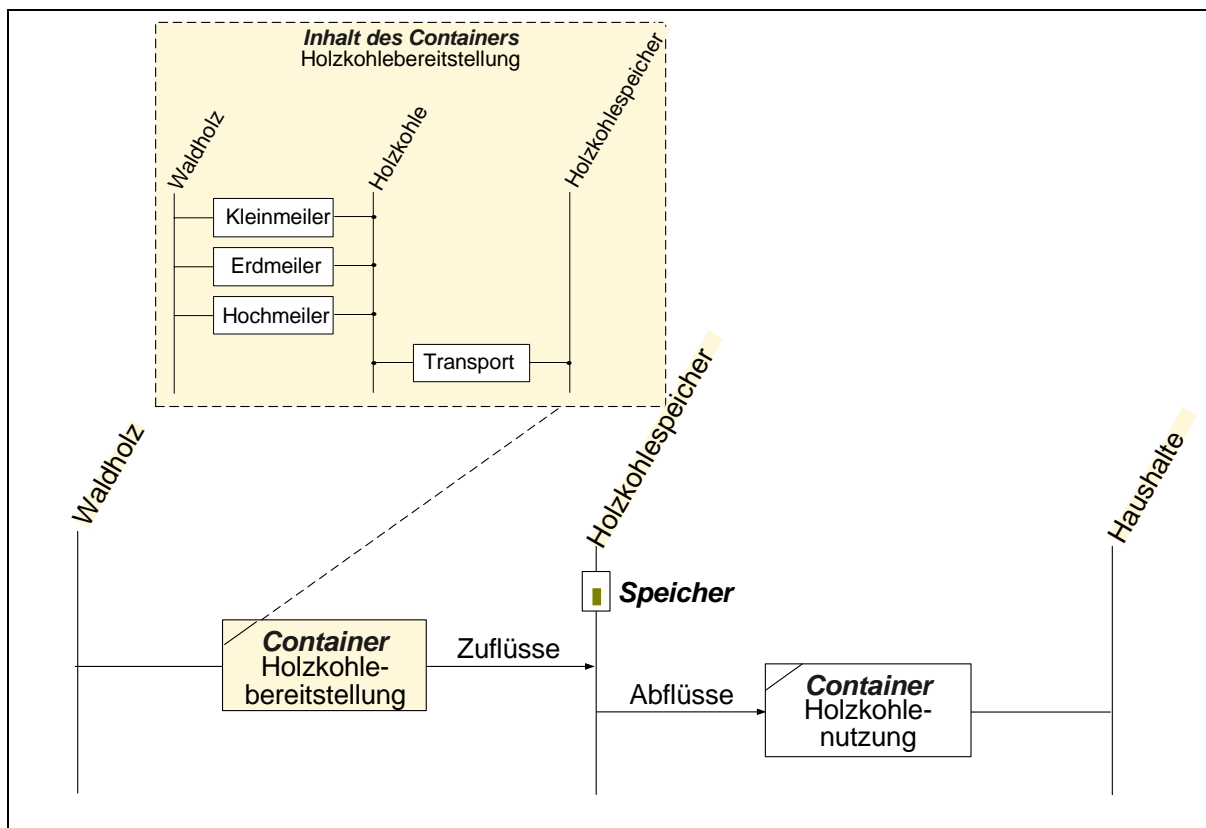


Abbildung 3-2: Speichergüter und Container im RES

Speichergüter stellen wichtige Elemente zur Abbildung der Realität von Systemen dar. Sie kön-

nen beispielsweise genutzt werden, um Veränderungen von Öl- und Gasvorräten zu simulieren.

Speichergüter können in zwischenliegenden Modellperioden nicht zusätzlich direkt befüllt werden. Sie können in zwischenliegenden Modellierungsperioden ausschließlich über Prozesse befüllt oder geleert werden.

Auf Grundlage von Realmodellen werden mathematische Modellierungsmethoden formuliert. Mit der Modellbildung werden Systeme mathematisch berechenbar. Mit der Modellierung des Systemverhaltens lassen sich entsprechende Veränderungen von Systemstruktur und -zustand berechnen /Kleemann, 2002/. Die Ergebnisse der Modellierung sollen dazu dienen, Struktur, Verhalten und Einflussparameter von Systemen zu erklären. Durch verschiedene Analyseinstrumente können die Ergebnisse unter bestimmten Annahmen abgesichert werden.

3.2 Modellsysteme zur Energie- und Kohlenstoffbilanzierung

Um natürliche Systeme in die künstliche Welt von Modellen zu übertragen, ist die abstrakte Sprache einer mathematischen Formulierung notwendig. Es entsteht ein sogenanntes Modellsystem.

Mit Modellen versucht man, das Systemverhalten besser zu verstehen, um daraus Entscheidungshilfen für eine zielgerichtete Beeinflussung des realen Systems abzuleiten /Kleemann, 2002/. Modelle sind ein Hilfsmittel zur Ermittlung von Konsequenzen möglicher Entscheidungen /Voß, 2002/. Sie sind sinnvoll, wenn Versuche nicht durchführbar, zu gefährlich oder zu teuer sind. /Voß, 2002/ weist darauf hin, dass in der Energiewirtschaft im Allgemeinen keine Experimente möglich sind. In der Forstwirtschaft sind Experimente auf Grund der komplexen Dynamik und den langen Beobachtungszeiträumen häufig ebenso wenig möglich. Ein Modelleinsatz ist für die vorliegende Fragestellung notwendig, weil Experimente an beiden Realsystemen nicht durchführbar sind.

/Kleemann, 2002/ klassifiziert Modelle allgemein nach drei Kriterien:

- Bestimmtheitsgrad (deterministische oder stochastische Modelle)
- Zeitrelation (statische oder dynamische Modelle)
- Art der Funktionen (lineare oder nicht-lineare Modelle)

Im Bereich der Energie- und Umweltmodellierung werden häufig deterministisch dynamische Modelle eingesetzt /Kleemann, 2002/, um mögliche zukünftige Entwicklungen unter bestimmten Bedingungen aufzeigen zu können. Je nach Modellzweck und mathematischem Ansatz wird in der Modellsystemanalyse zwischen mehreren Modellkategorien unterschieden. Das sind vor allem Simulations- und Optimierungsmodelle.

Um die Modellkategorie festzulegen, werden nachfolgend die Optimierung und die Simulation beschrieben.

3.2.1 Optimierung

Die Ursprünge der Optimierung gehen auf den zweiten Weltkrieg zurück. Die Optimierung hieß Optimalplanung (Operations Research) und wurde in England und den USA entwickelt.

Bei der Optimierung wird nach Extremwerten von Größen gefragt, die meistens von mehreren Variablen abhängen. Deshalb bedeutet optimal nicht dasselbe wie extremal. Optimal bedeutet „extremal unter gewissen Bedingungen“ /Duden, 2000/. Die Nebenbedingungen sind meistens durch Gleichungen oder Ungleichungen gegeben. Für die Variablen sind normalerweise einschränkende Nebenbedingungen erforderlich. Beispielsweise kann eine optimale Kraftwerksauslegung vom gegenwärtigen und zukünftigen Strom- und Wärmebedarf, der Energiepreispolitik und der Konkurrenzsituation mit anderen Betreibern abhängig gemacht werden.

Die Praxis verwendet traditionsgemäß die lineare Optimierung. Sie wird in der Energiewirtschaft vorwiegend für Betriebs-, Verteilungs- und Ausbauplanungen eingesetzt. Bei der Bewirtschaftung von Wäldern kann die lineare Optimierung beispielsweise zur Bestimmung einer optimalen Umtriebszeit von Beständen verwendet werden.

Die Optimierungsaufgabe besteht darin, eine Zielfunktion Z in den Entscheidungsvariablen x_j unter j Nebenbedingungen zu maximieren oder zu minimieren /Kleemann, 2002/, /Voß, 2002/.

Die Zielfunktion Z läßt sich folgendermaßen bestimmen:

$$Z(x_1, \dots, x_j) = c_1 x_1 + \dots + c_j x_j \rightarrow \text{minimal oder maximal}$$

In Anlehnung an /Molt, 2001/ kann ein lineares Optimierungsproblem folgendermaßen dargestellt werden:

$$\min \{Z\}, \text{ mit } Z = \sum_{j=1}^m c_j \cdot x_j \quad (3-2)$$

$$\sum_{j=1}^m a_{ij} \cdot x_j \left\{ \begin{array}{l} \geq \\ = \\ \leq \end{array} \right\} b_i, \quad i = 1, \dots, n$$

Nebenbedingungen mit den Nichtnegativitätsbedingungen: $x_j \geq 0, j = 1, \dots, m$

mit:

Z	Zielfunktion
x	Entscheidungsvariablen
c	Koeffizienten der Zielfunktion (Konstanten)
n	Anzahl der Restriktionen

m	Anzahl der Variablen
a	Koeffizienten der Restriktionen
b	Koeffizienten der rechten Seite

Der Index j kennzeichnet die Zeilen und i die Spalten

$j = 1, \dots, m$ (Laufindex der Variablen)

$i = 1, \dots, n$ (Laufindex der Restriktionen)

Mit Optimierungsmodellen soll die beste Systemkonfiguration oder das beste Systemverhalten im Sinne der Zielvorstellung ermittelt werden /Kleemann, 2002/. Dabei werden mathematische Verfahren eingesetzt, die das Optimum nach einer endlichen Zahl von Operationen finden.

3.2.2 Simulation

Der Begriff „Simulation“ kommt vom lateinischen Wort „simulare“ und bedeutet ähnlich machen beziehungsweise nachahmen. Dementsprechend definiert /Müller-Merbach, 1971/ die Simulation als „...zielgerichtetes Experimentieren an Modellen, die der Wirklichkeit nachgebildet sind.“ Mit anderen Worten bedeutet Simulation zum einen die Entwicklung von Modellen, welche die Realität abbilden, und zum anderen das Experimentieren mit diesen Modellen, um möglichst optimale Lösungen zu finden. Simulationsmodelle nennt man auch „deskriptiv“. Der Benutzer kann den Simulationsmodellen denkbare zukünftige Entwicklungen des realen Systems vorgeben /Schlenzig, 1998/.

Die Simulation lässt sich in die Echtzeit- und die diskrete Simulation einteilen. Eine Echtzeitsimulation bezieht sich gemäß /VDI, 1996/ auf die reale Zeit. Echtzeitsimulationen sind nicht geeignet, um lange Planungsabläufe darzustellen, weil sie meistens kleine beziehungsweise keine Zeitschritte sondern Zeitabläufe zugrunde legen. Echtzeitsimulationen können beispielsweise bei der Erforschung von technischen Prozessen (Motoren), von biologischen Prozessen (Schadstoffbelastung von Flüssen) und von Planetenbahnen wertvolle Hinweise liefern, jedoch nicht für die langen Planungszeiträume der Energie- und Forstwirtschaft. Hier kommen diskrete Simulationsmethoden in Betracht. Der Modellzustand ändert sich diskret, also zu bestimmten Zeitpunkten. Die einzelnen Zeitpunkte sind durch die gewählte Modellperiode voneinander getrennt.

/Spiecker, 1974/ trifft die Annahme, dass nicht das reale System selbst, sondern die Kenntnisse über das reale System den Ausgangspunkt von Simulationen bilden. Deshalb können abstrakte Systeme keine vollständige Wiedergabe der Realität sein, weil man nie sicher sein kann, alle Elemente, Eigenschaften und Wirkungszusammenhänge erfasst zu haben.

Von einer Simulation realer Systeme ist gefordert, dass das formale System dem realen in den Bereichen entspricht, die für den jeweiligen Zweck entscheidend sind. Das bedeutet, dass Struktur und Verhalten von Verfahrensabläufen "wirklichkeitsgetreu" wiedergegeben werden müssen. Durch einen Vergleich des Systems mit bereits vorhandenen empirischen

Untersuchungen kann die Abbildungsqualität überprüft bzw. verglichen werden. Die Simulationsergebnisse müssen letztendlich wieder auf das reale System übertragbar sein /Spiecker, 1974/.

3.2.3 Vergleich von Simulation und Optimierung

Um zu entscheiden, welche Modellklasse für die vorliegende Aufgabenstellung am geeignetsten ist, wird in diesem Abschnitt ein Vergleich von Simulation und Optimierung erstellt.

Sowohl mit der Simulation als auch mit der Optimierung können quantifizierbare Ergebnisse über Systeme gewonnen werden. Die Kosten der einzelnen Komponenten des Energiesystems bilden bei energiewirtschaftlichen Modellen in der Regel die Zielfunktion bei der Optimierung. Je weniger über die Kosten in der Realität bekannt ist, desto mehr wird die Simulation eingesetzt. Die Ergebnisse von Modellberechnungen sollen auch bei großen Systemen nachvollziehbar bleiben. Eine kompakte Struktur von Planungsinstrumenten ist in vielen Entwicklungsländern für eine erfolgreiche Einführung und Anwendung erforderlich, da die Datenbeschaffung schwierig ist. Die Kosten der Systemkomponenten sind meistens nicht oder nur sehr ungenau bekannt. Sie sind jedoch für eine Optimierung unbedingt erforderlich. Das bedeutet, dass für eine Optimierung in vielen Entwicklungsländern die Datengrundlage fehlt. Auch eine Minimierung der CO₂-Emissionen in Waldsystemen von Entwicklungsländern ist nicht durchführbar. Das hängt damit zusammen, dass sich Waldwachstumsmodelle hinsichtlich der CO₂-Emissionen nur optimieren lassen, wenn nichtlineare Gleichungen linearisiert werden. Da dieses Vorgehen die CO₂-Bilanzierung von komplexen Waldsystemen stark vereinfacht, ist eine Optimierung der CO₂-Emissionen nicht sinnvoll. Hinzu kommt, dass ein Gesamtmodell (Energie- und Waldmodell) viele nichtlineare Gleichungen enthält, die mit heutigen Berechnungsverfahren nicht lösbar sind.

Bezüglich einer Energie- und Kohlenstoffbilanzierung in Entwicklungsländern geht es um bislang völlig unzureichend beantwortete Fragen. Der Fragetypus lautet „Was geschieht, wenn...“. Für diesen Fragetypus ist laut /Voß, 2002/ die Simulationsmethode geeignet. Um die Kohlenstoffbilanz von Energie- und Waldsystemen zu bestimmen, lauten die Fragen in Entwicklungsländern: Was geschieht, wenn:

- der Energieverbrauch in den Entwicklungsländern rasant zunimmt?
- keine geeigneten Technologiesubstitutionen gefunden werden können, die Holz als Energieträger substituieren können?
- die Wälder weiter abgeholzt werden?
- die Bevölkerung wächst?
- sich die Kohlenstoffbilanz im System verändert?
- verschiedene Strategien und Maßnahmen kombiniert werden?

Auf Grund der zuvor genannten Argumente wurde die Simulation als Methode für die vorliegende Aufgabenstellung gewählt.

Vergleich von Simulationsinstrumenten in der Energiewirtschaft

Da zahlreiche Simulationsinstrumente existieren, ist für die Anwendung eine Auswahl erforderlich. Tabelle 3-1 gibt einen Vergleich von Planungsinstrumenten in der Energiewirtschaft. Für die Aufgabenstellung geeignete Simulationsinstrumente sollen möglichst viele Kriterien (siehe Tabelle 3-1) erfüllen, da sonst das Modell nicht hinreichend verändert und angepasst werden kann.

Tabelle 3-1: Vergleich von Simulationsinstrumenten in der Energiewirtschaft

Instrument	Modellgenerator	RES- basiert	Hierarchieebenen im RES	Modellstruktur	relationale zentrale Datenbank	Modellierungszeit	Treibhausgas-Bilanzierung	integriertes Szenario-management
EFOM-SIMUL (1)	ja	nein	nein	anpassbar	-	bis 25 Jahre	nein	-
ENPEP (2)	ja	nein	nein	anpassbar	ja	jährlich	ja	-
ENSYS (3)	nein	nein	nein	starr	nein	jährlich	nein	-
ETB (4)	ja	nein	nein	anpassbar		starr bis 2030	ja	ja
LEAP (5)	ja	ja	4	starr	ja	bis 100 Jahre	ja	ja
MAED (6)	nein	nein	nein	starr	nein		nein	ja
MEDEE (7)	nein	nein	nein	starr	nein	20-25	nein	ja
MESAP-PlaNet (8)	ja	ja	unbegrenzt	anpassbar	ja	unbegrenzt	ja	ja
MIDAS (9)	ja	nein	nein	starr	-	bis 25 Jahre	nein	ja
POLES (10)	nein	-	fix	starres Weltmodell	-	bis 2020	nein	ja
SESAM (11)	nein	nein	nein	starr	40 ASCII-Dateien	monatlich	nein	-

(1) /Voort et al., 1984/; (2) /IAEA, 2000/; (3) /Weimer-Jehle, 1996/; (4) /IAEA, 2000/; (5) /LEAP, 1997/ / LEAP, 2002/ /Stuible, 2002/; (6) /Charpentier et al., 1983/ /Schlenzig, 1998/ /Stuible, 2002/ /IAEA, 2000/; (7) /Camos et al., 1986/ /Stuible, 2002/; (8) /Blesl et al., 1998/ /Schlenzig, 1998/ /Stuible, 2002/; (9) /Capros, 1995/ /IAEA, 1995/ /Stuible, 2002/ /TROLL, 2002/; (10) /Criqui et al., 1997/; (11) /IAEA, 2000/

Erfüllte Kriterien werden mit „ja“ gekennzeichnet, nicht erfüllte mit „nein“. Konkrete Angaben gibt es dort, wo eine Quantifizierung getroffen werden kann, wie beispielsweise bei der Anzahl von hierarchischen Ebenen im RES.

Mit Planungsinstrumenten, die zu den Modellgeneratoren gehören, kann der Modellierer die Struktur des Modells verändern und damit die Realitäten auf die jeweiligen Anforderungen zur Realitätsabbildung vielfältiger manipulieren. RES-basiert bedeutet, dass die Realität vereinfacht über das sogenannte Referenzenergiesystem abgebildet wird. Durch Hierarchieebenen im RES wird eine regionale und auch sektorale Untergliederung des RES möglich. Eine Unterscheidung zwischen einer anpassbaren und einer starren Modellstruktur ist deshalb wichtig, weil bei anpassbaren Modellstrukturen weitere mathematische Modelle an die gleiche „Realitätsstruktur“ angeknüpft werden können. In der zentralen Datenbank werden alle Daten, die während einer Fallstudie anfallen, gespeichert. Die Modellierungszeit gibt die Zeit vom Beginn bis zum Ende der Modellierung an. Mit der Angabe zur Treibhausgasbilanzierung (THG-Bilanzierung) wird gesagt, ob es möglich ist, den Ausstoß an Emissionen zu modellieren. Integriertes Szenariomanagement wird dann mit „ja“ gekennzeichnet, wenn vorgesehen ist, mit einer Grundstruktur mehrere Szenarien zu berechnen, ohne dass die Szenarien separat abgespeichert werden müssen. Szenarien bestehen aus exogenen Randbedingungen, die durch den Planer nicht beeinflusst werden können sowie Maßnahmen, die in der Modellierungszeit durchgeführt werden können.

Die Tabelle zeigt, dass für die Aufgabenstellung zwei Planungsinstrumente in Betracht kommen: MESAP und LEAP. Im folgenden Abschnitt wird MESAP vorgestellt. Es wird anschließend mit LEAP verglichen, das häufig in Entwicklungsländern eingesetzt wurde. Aus diesem Vergleich wird eine der beiden Methoden gewählt.

3.3 MESAP PlaNet und LEAP

MESAP ist ein RES-basiertes Instrument für die Energie- und Umweltplanung. Das RES ist in MESAP 4 als graphische Oberfläche integriert. MESAP hat eine Datenbank, auf die verschiedene Planungsinstrumente zugreifen können. Energiesystemmodelle zur Simulation und Optimierung können die gemeinsame Datenbank gleichzeitig nutzen. Die MESAP-Datenbank enthält alle Daten für die Modellierung /Schlenzig, 1998/.

Die modellspezifischen Daten (mathematisches Modell) werden modellbezogen in der Datenbank abgelegt, da jedes Modell eine andere Gleichungsspezifikation benötigt, aus der jeweils mit Hilfe eines Modellgenerators das Gleichungssystem erzeugt werden kann. Das Planungsinstrument MESAP/PlaNet trennt somit die Daten von der durch das RES beschriebenen Struktur eines Modells und vom spezifischen formalen, mathematischen Modell /Schlenzig, 1998/.

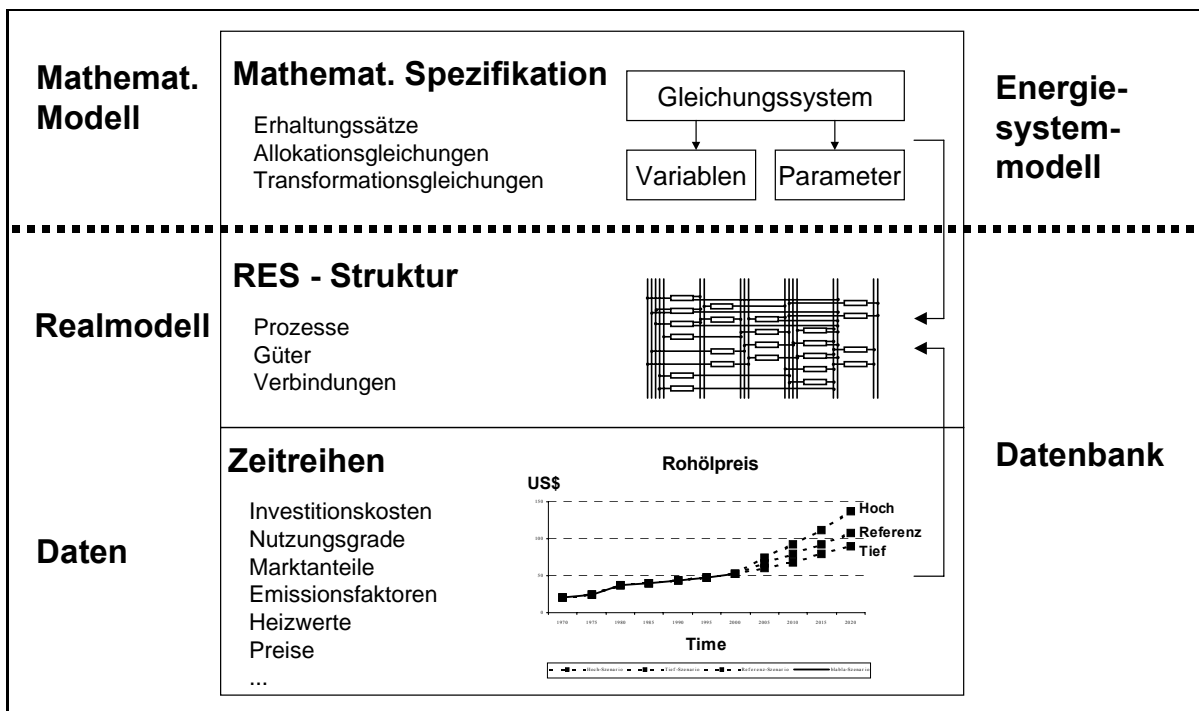


Abbildung 3-3: Daten, Modellstruktur und mathematisches Modell in MESAP /Schlenzig, 1998/

Die Datenbank beinhaltet die Zeitreihen von Systemparametern und Systemvariablen, wie in Abbildung 3-3 von /Schlenzig, 1998/ dargestellt. Das Realmodell enthält die Informationen über die Struktur des Modells in Form der prozessanalytischen Netzwerkdarstellung des RES. Das Realmodell ist gleichzeitig die Schnittstelle zur modellspezifischen dritten Schicht, dem eigentlichen Energiesystemmodell.

Durch die getrennte Verwaltung der modellspezifischen Daten - der Gleichungen - wird es möglich, unterschiedliche Energiesystemmodelle an dasselbe RES zu koppeln /Schlenzig, 1998/, /Stuible, 2002/.

3.3.1 Simulationsmodul PlaNet

Das mathematische Simulationsmodell PlaNet (Planning Network) ist direkt in MESAP eingebunden. PlaNet simuliert die Stoffströme und bei Bedarf auch die Kosten im RES. Das RES ist mit dem Modellgenerator und dem Simulationsmodell PlaNet verknüpft /Stuible, 2002/.

Das mathematische, formale Modell für die Simulation eines Energiesystems mit PlaNet besteht aus Erhaltungsgleichungen für die Güter, aus Transformationsgleichungen für die Prozesse des Modells, aus Zuordnungsgleichungen für die Aufteilung von Gütern auf verschiedene Prozesse sowie aus exogenen Vorgabegleichungen /Schlenzig, 1998/, /Stuible, 2002/.

Über das RES ergeben sich vielfältige Möglichkeiten zur Darstellung der Realität und deren Szenarienbildung in die Zukunft. So können beispielsweise mit PlaNet CO₂-Bilanzen berechnet werden, die auf der Energiesystemmodellierung aufbauen.

PlaNet ist ein zeitreihenbasiertes Modell. Historische Daten von Eingangsvariablen einer Zeitreihe können in die Zukunft fortgeschrieben werden. Bei diesem Vorgang legt man Trends der Vergangenheit zugrunde, extrapoliert die Trends und erzeugt Werte (sogenannte Tupelwerte) der Zukunft. Genauso kann PlaNet zwischen zwei Tupelwerten in einer Zeitreihe interpolieren. Durch eine Szenarioanalyse können die Eingangsvariablen variiert werden. Szenarien sind exogene Vorgaben langfristiger Änderungen bestimmter Variablen der Rahmen- und Umweltbedingungen /Voß, 2002/. Zukünftige mögliche Entwicklungen lassen sich durch eine Szenarioanalyse stärker absichern. Je weiter man sich vom Jetztzeitpunkt in die Zukunft bewegt, desto größer wird die Bandbreite möglicher Entwicklungstendenzen.

Das von PlaNet generierte Energiesystemmodell ist ein lineares, sequenziell lösbares Gleichungssystem. Die quasikontinuierliche Simulation erfolgt auf der Basis der Berechnung von Flussgleichgewichten im Energiesystemmodell /Schlenzig, 1998/.

Mit MESAP/PlaNet lassen sich Energie- und Kohlenstoffbilanzen szenarisch absichern. Das ist deshalb wichtig, weil Szenarien verschiedene Maßnahmen enthalten. Einzeln durchgeführte Maßnahmen können wegen der Verkettung von Prozessen bei der CO₂-Bilanzierung nicht einfach aufsummiert werden, sondern beeinflussen die Bilanz wechselseitig, wenn sie voneinander abhängen. Eine Strategie besteht aus einer Menge von n Maßnahmen. Es kann der folgende mathematische Zusammenhang formuliert werden:

Strategie besteht aus {Maßnahmen n }

$$\sum_{i=1}^n CO_2\text{-Minderung}_{\text{Maßnahme } i} \neq CO_2\text{-Minderung}_{\text{Strategie}} \quad (3-3)$$

Damit ist die Summe aller CO₂-Minderungsmaßnahmen ungleich der CO₂-Minderungen einer Strategie mit allen Maßnahmen 1 bis n , weil die bereits eingesparte Energie im System nicht noch einmal eingespart werden kann. Das ist ein klassisches Argument in der Systemtheorie und gilt für den Fall der wechselseitigen Abhängigkeit.

3.3.2 Simulationsmodell LEAP

In der vorliegenden Bewertung wird MESAP mit LEAP (Long-range Energy Alternatives Planning System) verglichen. LEAP ist eine weit verbreitete Simulationsmethode in Entwicklungsländern /IAEA, 2000/.

Eine der **Gemeinsamkeiten** ist, dass der Modellierer nicht nur die RES-Struktur des Modells verändern, sondern auch hierarchisch gliedern kann. Beide Planungsinstrumente werden in einigen Entwicklungsländern bereits eingesetzt. Typische gemeinsame Einsatzgebiete von LEAP und MESAP sind die vereinfachten Abbildungen von Energiesystemen /IAEA, 2000/. Beide Planungsinstrumente sind auch zur Umweltplanung einsetzbar. LEAP kann statische einfache Landnutzungssysteme abbilden /IAEA, 2000/. MESAP kann aufgrund einer Adaption von /Frey, Neubauer, 2002/ ebenfalls einfache Landnutzungssysteme abbilden.

Es gibt jedoch beträchtliche **Unterschiede**. Gemäß /IAEA, 2000/ ist die erforderliche Datenintensität (Menge von Daten) für einen LEAP-Einsatz gering. Dagegen erfordert MESAP mittlere bis hohe Datenintensitäten /IAEA, 2000/. Das heißt, dass LEAP weniger Eingangsvariablen (Parameter) benötigt als MESAP, um ein System zu modellieren. Mit LEAP können maximal vier hierarchische Ebenen erzeugt werden /LEAP, 2002/, wie in Tabelle 3-1 gezeigt wurde. MESAP hingegen unterliegt keinerlei Beschränkungen hinsichtlich einer hierarchischen Gliederung des RES /Stuible, 2002/. In einigen Projekten zeigte sich, dass eine Unterteilung in mehr als vier Ebenen sinnvoll ist. Das RES für das CHAPOSА-Projekt im südlichen Afrika (Charcoal Potential in Southern Africa) wurde beispielsweise in sechs Ebenen unterteilt, um das Studiengebiet nach Staaten, Regionen, Sachgebieten, Sektoren und Technologien zu strukturieren /Frey, Neubauer, 2002/. Eine weitere Einschränkung ist, dass sich neue Elemente nur durch Programmierung in der Systemdatenbank an das RES von LEAP anknüpfen lassen, weil keine externen Zeitreihen in die Datenbank geschrieben werden können. Weitere mathematische Modelle sind nicht an LEAP anknüpfbar, weil das mathematische Simulationsmodell von LEAP nicht vom RES getrennt werden kann. Eine Berechnung mit dynamischen Strukturen unter Einbindung von Waldmodellen ist damit nicht möglich. Durch diese Einschränkungen eignet sich LEAP nicht als Planungsinstrument für eine systemübergreifende Energie- und Kohlenstoffbilanzierung von Energie- und Waldsystemen im Rahmen der Zielsetzung dieser Arbeit. Aufgrund des vorliegenden Vergleichs wurde MESAP/PlаNet zur Abbildung der Energie- und Kohlenstoffbilanz im Energiesystem gewählt.

3.3.3 Bisherige Anwendungen von MESAP PlаNet in Entwicklungsländern

In diesem Abschnitt werden zwei Modelle in Entwicklungsländern beschrieben, die mit MESAP/PlаNet modelliert wurden. Das sind das Modell ARGUS (Agro-ökologisch-regionalisiertes Modell) /Rivas, 2001/ und das Modell im CHAPOSА-Projekt /Frey, Neubauer, 2002/.

ARGUS wurde zur Analyse des Brennholzversorgungssystems in Entwicklungsländern entwickelt. Es handelt sich um ein regionalisiertes Modell. Für jede Region wird ein eigenes RES aufgebaut. Dadurch können agro-ökologische Eigenschaften der Landnutzung berücksichtigt werden. Bei der Modellbildung werden die geographischen Erscheinungsmerkmale in ein RES umgewandelt. Mit ARGUS werden die Gewinnung, die Versorgung und der Verbrauch des Energieträgers Holz betrachtet /Rivas, 2001/. Mit dem Modell können jedoch nicht die Veränderungen von Waldentwicklungen unter verschiedenen Rahmenbedingungen berechnet werden. Es wurde nicht für eine Kohlenstoffbilanzierung konzipiert.

Erste Versuche, ein Energie- und Waldsystem über ein RES miteinander zu verknüpfen, führten /Frey, Neubauer, 2002/ im Rahmen des CHAPOSА-Projektes durch. Zunächst wurde das Energiesystem modelliert. Danach wurde das Waldmodell aufgebaut. Die Waldentwicklung im Modellierungszeitraum wurde durch den jährlichen Zuwachs und den jährlichen Holzabfluss beeinflusst. Das Waldmodell wurde mit dem Energiemodell über den

Primärenergieträger Holz verknüpft. Ähnlich wie in anderen Waldwachstumsmodellen lassen sich Einzelbestände über die einzelnen Modellperioden nicht verändern.

3.4 Waldwachstumsmodelle als Grundlage einer Kohlenstoffbilanzierung

In den folgenden Kapiteln werden Waldwachstumsmodelle beschrieben, die als Basis für eine Kohlenstoffbilanzierung in Wäldern dienen.

Für Waldwachstumsprognosen als Grundlage einer Kohlenstoffbilanzierung sind das Klima, die geographische Lage, die dynamischen Wechselwirkungen von Beständen mit Bodentypen, das Wachstum, Störeinflüsse sowie lange Planungs- und Produktionszeiträume zu berücksichtigen.

3.4.1 Historie und gegenwärtige Situation

Die Modellierung von Wäldern geht auf Paulsen (1748 - 1825) zurück. Er entwickelte die ersten Ertragstafeln zum prognostizierten Wachstum in Reinbeständen. In den folgenden 150 Jahren wurden in Europa zahlreiche Ertragstafeln für unterschiedliche Reinbestände erarbeitet, mit denen das Wachstum von Beständen auf verschiedenen Standorten abgeschätzt werden kann. Diese galten bis in die 90er Jahre des 20. Jahrhunderts fast ausschließlich für Reinbestände. Auf dieser Grundlage bauen bis heute alle Modelle für Plantagenwirtschaft auf, weil das Wachstumsverhalten in Reinbeständen im Vergleich zu mehrstufigen Beständen relativ wirklichkeitstreu nachgebildet werden kann.

Anfang der 1970er Jahre bekam die Modellierung von Waldbeständen eine völlig neue Dimension. Durch die Ölkrise wurden „neue“ Energieressourcen gesucht, welche die Abhängigkeit vom Öl verringern sollten. Eine Möglichkeit wurde in der energetischen Nutzung von Wald- und Restholz gesehen /Löffler, 1995/. Mit Potenzialabschätzungen sollten zunächst die nachhaltig verfügbaren Holzressourcen zur energetischen Nutzung ermittelt werden. Durch die Verringerung des Ölpreises wenige Jahre später wurden die Mittel für die Waldmodellierung wieder zurückgeschraubt. Durch fehlende finanzielle Mittel konnten zahlreiche Forschungsansätze nicht weiterverfolgt werden. Das Know-how in diesem Bereich ging stark zurück.

Seit den 1990er Jahren hat das Interesse erneut deutlich zugenommen. Die Forstwirtschaft erkannte, dass weitergehende Modellierungsansätze gefunden werden müssen, um die komplexen Wechselwirkungen von Wäldern abzubilden. /Gadow, Hui, 1999/ unterscheiden prinzipiell vier Modellkategorien, die in den nächsten Abschnitten beschrieben werden. Das sind:

- Einzelbaummodelle
- Größenklassenmodelle
- Bestandesmodelle
- Regionale Waldwachstumsmodelle

3.4.2 Einzelbaum- und Größenklassenmodelle

Die **einzelbaumweise Modellierung** ermittelt die Entwicklung eines Baumes über seine Lebenszeit. Sie bezieht sich auf Schaftausformung, Wurzelwachstum und morphologische Details. Sie wird aus konkreten dendrologischen Untersuchungen (Untersuchungen des Holzes) gewonnen. Durch einzelbaumweise Untersuchungen kann das individuelle Kohlenstoffspeichervermögen von einzelnen Bäumen bestimmt werden. /Le Roux et al., 2001/ haben 27 Einzelbaummodelle und ihre Aussagefähigkeit für eine Kohlenstoffbilanzierung untersucht. Sie identifizierten bei den Modellen drei wesentliche Probleme:

- Die Einlagerung von Kohlenstoff bei gegenseitiger Konkurrenz ist wenig erforscht
- Die dynamischen Kohlenstoffspeicherungsprozesse sind nicht berechenbar
- Die unterirdischen Prozesse werden in den meisten Modellen nicht berücksichtigt

Einzelbäume bilden in dieser Modellbetrachtung bereits ein System für sich. Einzelbaummodelle können eine Grundlage für bestandsweise Untersuchungen sein. Für eine Modellierung der Kohlenstoffbilanz in Waldsystemen sind Einzelbaummodellierungen jedoch ungeeignet, da das Konkurrenzverhalten mit anderen Baumarten sowie Wechselwirkungen mit dem Bodentyp und der Umwelt nicht berücksichtigt werden.

In **Größenklassenmodellen** bildet eine Baumart den Hauptbestand, auf den bei der Modellierung hauptsächlich geachtet wird. Der Bestand wird mit dieser einen Baumart in Größenklassen zusammengefasst. Die Größenklassenmodelle dienen der Darstellung der Durchmesserverteilung von Bäumen in Beständen. Mit ihnen möchte man letztendlich den sogenannten Durchmessermittelstamm von Beständen ermitteln. Über den Durchmessermittelstamm lassen sich die Vorräte auf der Fläche von vergleichbaren Beständen gleichen Alters ohne Messungen abschätzen. Durch Bestimmung des Durchmessermittelstamms in Beständen unterschiedlichen Alters kann das durchschnittliche Wachstum von Beständen aufgezeigt werden. Allerdings ist nicht vorgesehen, Änderungen der Bewirtschaftungsart zu berücksichtigen, wodurch sich die Größenklassen verschieben können. Für eine Kohlenstoffbilanzierung reicht die Größenklassenmodellierung nicht aus.

3.4.3 Bestandesmodelle

Die bestandesweise Modellierung beschäftigt sich mit dem Verhalten von Beständen auf verschiedenen Standortverhältnissen. Die Standortverhältnisse spiegeln im wesentlichen die bodenkundlichen und klimatischen Verhältnisse wider. Bestandesweise Modellierungen sind für eine Kohlenstoffbilanzierung geeignet, da sie die Systemverhältnisse im Vergleich zu den Einzelbaum- und Größenklassenmodellen abbilden können. Sie dienten lange Zeit zur Beantwortung der Frage, welche standortgerechten Bestände in kurzer Zeit einen hohen Holzertrag liefern können. Allerdings sind die Wechselwirkungen in Beständen weitgehend unklar. Es

fehlt eine geeignete Methode zur Quantifizierung der Wechselwirkungen von verschiedenen Bestandestypen auf unterschiedlichen Bodentypen.

Die bestandesweise Modellierung geht auf /Hundeshagen, 1826/ zurück. Er führte das sogenannte „Normalwaldmodell“ ein. Es gilt gemeinhin als ein erstes naturwissenschaftliches Simulationsmodell.

Normalwaldmodell

Das Normalwaldmodell hat eine Größe von 100 ha (Hektar), in dem jede Altersstufe mit jeweils einem ha vertreten ist. Das Normalwaldmodell setzt damit Umtriebszeiten von 100 Jahren voraus. Die Umtriebszeit entspricht der Dauer von der Pflanzung oder Naturverjüngung bis zur Ernte. Die Übergangswahrscheinlichkeit von einer Periode in die nächste ist gleich. /Hundeshagen, 1826/ geht in seiner Theorie davon aus, dass alle Übergangswahrscheinlichkeiten von einer Altersklasse in die nächste gleich sein müssen, damit das Modell stimmig bleibt.

Normalwald heißt auch Nachhaltigkeitswald, weil er nachhaltig bewirtschaftet wird. Sein gesamter Zuwachs kann jährlich genutzt werden, da er im gleichen Maße nachwächst. Das heißt, dass der Bestand im Alter 100 den gesamten Zuwachs der Bestände vom Alter 1 bis zum Alter 99 beinhaltet. Normalwald ist per Definition ein Wald, bei dem alle Randbedingungen über die Zeit konstant bleiben. Das Modell unterstellt völlig einheitliche Verhältnisse von Monokulturen auf gleichen Standorten und unter identischen Klimaverhältnissen. Ob reale Wälder Kohlenstoffspeicher sein können, ist über das Modell nicht zu beantworten. Es lassen sich jedoch theoretische Anhaltswerte ablesen. /Burschel, Weber, 1990/ haben aus dem Normalwaldmodell entsprechende Kohlenstoffvorräte abgeleitet.

Normalwald kann bis zu 13.000 t Kohlenstoff auf 100 ha dauerhaft speichern /Burschel, Weber, 1990/. Das entspricht circa 48.000 t CO₂. Er akkumuliert rund 54.000 m³ Holz im Stammholz. Darin sind 10.000 t Kohlenstoff gebunden. Rund 36.700 t CO₂ werden der Atmosphäre entzogen. Hinzu kommen Äste, Wurzeln und Rinde mit einem Anteil von ca. 33% der Schaftmenge /Burschel, Weber, 1990/.

Es wird der jährliche Einschlag in $t = 100$ und die Pflanzung in $t = 1$ pro Hektar berücksichtigt. Reale Variationen im System sind über dieses Modell nicht berechenbar. Der Einschlag in $t = 100$ kann theoretisch eine Menge X an fossilen Energieträgern ersetzen. Nachdem der Normalwald aufgebaut ist, ist die Speicherfähigkeit = 0, da per Definition ein Flussgleichgewicht von Zu- und Abgang herrscht.

Simulationsmodell FORSKA

FORSKA wurde in den 90er Jahren entwickelt und simuliert mögliche Waldentwicklungen unter veränderten klimatischen Bedingungen /Le Roux et al., 2001/. Mit FORSKA sollen mögliche Waldbaustrategien abgeleitet werden, um Baumarten zu begünstigen, die den jeweiligen klimatischen Verhältnissen am besten angepasst sind.

Die Version FORSKA 2 wird in Skandinavien überwiegend zur Simulation der borealen Waldentwicklung eingesetzt /Prentice, Leemans, 1990/. Im Rahmen einer Klimawirkungsstudie für das Land Brandenburg wurde das Waldsukzessionsmodell mit zusätzlichen Umweltwirkungsfunktionen ergänzt und regional als FORSKA M angewendet /Pretzsch, Seifert, 2000/. Mit FORSKA M soll bestimmt werden, wie sich das Wachstum einzelner Baumarten und Bestände in bewirtschafteten Wäldern bei möglichen Klimaschwankungen verändert. Die simulierte Klimaänderung führte überall zu veränderten Baumartenzusammensetzungen. Allerdings ist das Modell auf zwei Größenklassen beschränkt.

Mit dem Modell soll untersucht werden, wie sich ein geändertes Klima auf den zukünftigen Waldbau auswirken kann. Die Frage ist demnach nicht, wie viel Kohlenstoff mit welcher Maßnahme gespeichert werden kann, sondern welche Waldbaustrategien aus einem veränderten Klima abgeleitet werden können. FORSKA berücksichtigt seiner Konzeption gemäß den oberirdischen Bestand, weil die Biomasse im Boden für die Bewirtschaftung unwesentlich ist.

Eine Anbindung an MESAP war nicht sinnvoll, weil mit FORSKA die Fragestellungen der vorliegenden Arbeit nicht beantwortet werden können.

Die Projektion von Holzvorräten in die Zukunft ist wesentlich für die Holzeinschlagsplanung und die Modellierung von Wäldern. Das Bestandesvolumen pro Flächeneinheit kann für ein gegebenes Alter geschätzt werden. Dies bildet die Basis für die Projektion /Gadow, Hui, 1999/.

Gleichaltrige Bestände entwickeln sich mehr oder weniger gleichmäßig innerhalb der Umtriebszeit, die beim Aufbau von Plantagen das entscheidende Kriterium ist. Verfolgt man hingegen das Ziel, einen Sekundärwald aufzubauen, verschieben sich verschiedene Kriterien. So wird man bestrebt sein, autochtone Arten in Mischung anzupflanzen, um die Stabilität des späteren Altbestandes zu verbessern und um Insektenkalamitäten vorzubeugen. Der Aufbau eines Sekundärwaldes geht meistens mit einer intensiven Pflege einher, wo in der Jungwuchsphase unerwünschte Dornenhecken entfernt werden, um für die Bestandespflanzen optimale Wachstumsbedingungen zu schaffen. Im späteren Pflegestadium, der sogenannten Durchforstung, wird erstes Nutzholz geerntet, das häufig als Brennholz verwendet wird.

Durch Verwendung von Funktionen aus der empirischen Feldforschung kann der Holzvorrat für gleichaltrige Bestände abgeschätzt werden. Alternativ lässt sich eine theoretische Feldfunktion verwenden. Bei dieser Methode werden die durchschnittlichen jährlichen Zuwächse und der Zeitpunkt der Zuwachskulmination verwendet /Gadow, Hui, 1999/.

In vielen Entwicklungsländern fehlen Forstinventuren. Diese dienen als Basis für Waldwachstumsprognosen. Auf der anderen Seite weist /Schmaltschinski, 1998/ darauf hin, dass Waldwachstumsprognosen eine dynamische Ergänzung (Komplement) zu den statischen Forstinventuren sind. Das hängt mit den langen Perioden von Forstinventuren zusammen, die besondere Ereignisse wie Stürme und andere Katastrophen nicht berücksichtigen können. Als Datengrundlage für Waldwachstumsprognosen werden daher Einzelbestände periodisch gemessen und bewertet.

3.4.4 Regionale Waldwachstumsmodelle

/Schmaltschinski, 1998/ verwendet in seiner regionalen Waldwachstumsprognose die durchschnittliche Grundfläche einer Baumart in einem bestimmten Alter als zentrales Element. Vorräte, Bestockungsgrade oder Bonitäten (Zuwachsvermögen von Beständen auf verschiedenen Standorten) sind weitere Variablen. Die Fortschreibung der Grundflächen und die daraus resultierende Altersklassenverteilung ist von den jährlichen Endnutzungen abhängig.

/Kouba, 1974/ stellt die zeitlichen Veränderungen von Altersklassen mit diskretem Zustands- und Parameterraum über Markow-Ketten dar /Schmaltschinski, 1998/. Bei einer jährlich wiederholten Flächenaufnahme einer Betriebsklasse lautet der Altersvektor in Anlehnung an /Feller, 1968/ wie in Gleichung (3-4) dargestellt. Die Betriebsklasse hat fünf Altersstufen.

$$\vec{F}^t = (F_1^t, F_2^t, F_3^t, F_4^t, F_5^t) \quad (3-4)$$

Die Indizes der Vektoren aus Gleichung (3-4) sind die einzelnen Flächenalter der Matrize (F_{ij}). Eine Fläche im Alter $i = 5$ geht durch Endnutzung in Alter $i = 1$ über. Um die Übergangswahrscheinlichkeit zu ermitteln, mit der eine Altersklasse in eine andere wechselt, werden die Übergangswahrscheinlichkeiten einer Zeile F_{ij} durch das Tupel des Flächenvektors F_i^t dividiert, wie in Gleichung (3-5) formuliert ist /Schmaltschinski, 1998/:

$$p_{ij} = \frac{F_{ij}}{F_i^t} \quad (3-5)$$

$p_i(t)$ ist die Zustandswahrscheinlichkeit für eine Flächengröße zum Zeitpunkt t im Alter i . Nach /Schmaltschinski, 1998/ ist der Vektor $\vec{p}(t) = (p_i(t))$ die Zustandsverteilung. Die Zustandsverteilung bezeichnet die relativen Flächenhäufigkeiten mit dem Alter p_{ij} und ist ein sogenannter Maximum-Likelihood-Schätzer für die Übergangshäufigkeiten. Das Häufigkeitstableau wandelt sich zu einer Matrix mit den relativen Übergangswahrscheinlichkeiten aus Gleichung (3-6) /Schmaltschinski, 1998/.

$$P = (p_{ij}) = \begin{pmatrix} p_{11} & \dots & p_{15} \\ \cdot & \dots & \cdot \\ p_{51} & \dots & p_{55} \end{pmatrix} \quad (3-6)$$

Die stochastische Matrix hat folgende Eigenschaften:

für alle i und j aus $\{1...m\}$

für einen festen Index j gilt für $i = 1...m$

Nach /Schmaltschinski, 1998/ ist eine Menge von Zuständen abgeschlossen, wenn kein Zustand außerhalb dieser Menge erreichbar ist. Dies gilt für Übergänge $i \rightarrow i + 2$ und nahezu alle $i \rightarrow i - 1$, wobei die Übergänge mit Rücksicht auf die Indexmenge $\{1..5\}$ zu sehen sind.

/Schmaltschinski, 1998/ bezeichnet erreichbare Zustände als „transient“.

Das Produkt aus der Zustandsverteilung und der Matrix ergibt die nachfolgende Zustandsverteilung. Für das einzelne Tupel des Vektors gilt nach /Schmaltschinski, 1998/

$$p_j(t+1) = \sum p_j(t) p_{ij} \quad (3-7)$$

Wird die Zustandshäufigkeit mit der Gesamtfläche multipliziert, so erhält man die konkrete Altersklassenverteilung. Durch Beobachtung bei wiederholten Inventuren oder aufgrund von Forsteinrichtungsergebnissen kann die konkrete Übergangsmatrix geschätzt werden.

Dabei ist vorausgesetzt, dass Zustandsverteilung und Übergangsmatrix unabhängig voneinander sind. Die Markow-Kette heißt dann homogen. Dies gilt nur dann, wenn die einschrittigen Übergangswahrscheinlichkeiten unabhängig von der Zeit sind. Der Prozess heißt dann auch Markow-Kette mit stationären Übergangswahrscheinlichkeiten /Schmaltschinski, 1998/.

Die Endnutzungen mit anschließender Verjüngung auf den Flächen können auf zwei Arten entstehen: geplant oder durch zufällige Ereignisse. Planung und zufällige Ereignisse oder Risiken wie beispielsweise Feuer verändern in der Übergangsmatrix nur die Wahrscheinlichkeiten der Übergänge in die erste Altersklasse. Unter der Annahme stationärer Übergangswahrscheinlichkeiten entspricht die Matrix dem arithmetischen Mittel der Übergangshäufigkeiten der Fläche. Das Normalwaldmodell nach /Hundeshagen, 1826/ geht, wie bereits erwähnt, von dem speziellen Fall aus, dass alle Übergangswahrscheinlichkeiten von einer Altersklasse in die nächste gleich sind.

Schwierigkeiten bei der Prognose von Bestandesentwicklungen ergeben sich aus einer unübersehbaren Menge von abhängigen Ereignissen. /Schmaltschinski, 1998/ weist darauf hin, dass bereits die exakte Stoffwechselbilanz eines Nadelwaldes ausgesprochen schwer quantifizierbar ist.

Schmaltschinski stellt für eine zukünftige waldwachstumskundliche Forschung heraus, dass der Erklärungsgehalt von regionalen Waldwachstumsmodellen gering ist. Ihre Plausibilität ist jedoch im großräumlichen Zusammenhang stimmig. Hochentwickelte Einzelbaum- und Bestandesmodelle können dagegen einen hohen Erklärungsgehalt haben /Schmaltschinski, 1998/. Schmaltschinski sieht einen wesentlichen zukünftigen Forschungsbedarf in der Harmonisierung von Modellbildungsansätzen von den Einzelbaum- bis zu Regionalmodellen.

Das Dilemma besteht darin, dass die vorhandenen bestandesweisen Waldmodelle die Parameter für eine Kohlenstoffbilanzierung nicht ausreichend berücksichtigen. Der Bestand wird unabhängig von den Böden und dem Wurzelwachstum modelliert. Regionalmodelle sind zwar stimmig, aber als solche für eine Kohlenstoffbilanzierung nicht geeignet, weil Veränderungen von Beständen und Böden nicht berücksichtigt werden. Allerdings haben seit Anfang der 1990er Jahre die Untersuchungen der Kohlenstoffvorräte in Wäldern eine stärkere Bedeutung gewonnen.

3.4.5 Kohlenstoffvorräte in Waldsystemen

In diesem Abschnitt werden Modellierungsmethoden vorgestellt, mit denen Kohlenstoffvorräte in Waldsystemen quantifiziert werden können. Man möchte wissen, ob sich aus waldbaulichen Maßnahmen eine CO₂-Speicherung oder CO₂-Freisetzung ableiten lässt.

Carbon implications of forest management strategies

Das Modell wurde zur Darstellung vereinfachter Kohlenstoffflüsse des Waldes unter Berücksichtigung verschiedener Bewirtschaftungsmaßnahmen aufgebaut /Schlamadinger, Marland, 1994/. Ziel der Modellierung war der Vergleich der Kohlenstoffbilanzen zwischen:

- Herstellung verschiedener Holzprodukte
- Verbrennung von fossilen Energieträgern mit der von Bioenergieträgern

Für die Kohlenstoffmodellierung zogen /Schlamadinger, Marland, 1994/ folgende Daten heran:

- Anteile von kurz- und langlebigen Holzprodukten
- CO₂-Emissionen bei der Herstellung der Holzprodukte im Vergleich
- Wirkungsgrade bei der Verbrennung von Bio- und fossilen Energieträgern
- Fossiler Energieverbrauch für Ernte, Pflege, Herstellung der Bioenergie
- Fossiler Energieverbrauch für Umwandlung von Biomasse in Wärme und Strom

Das Modell verwendet einfache und statische Wachstumsvorgänge. Der stehende Bestand ist definiert durch die Umtriebszeit und einen jährlichen Zuwachs. Der stehende Bestand kann bis zu 80 t C pro ha speichern. Der Referenzbestand ist ein 100-jähriger Wirtschaftswald, der nicht weiter bewirtschaftet wird.

Mit dieser Studie konnte eine grobe Schätzung der Kohlenstoffkreisläufe verschiedener Bestände der gemäßigten Breiten gegeben werden. Es handelt sich bei den forstlichen Szenarien um statische Betrachtungen mit vorgegebenem Verlauf über die Zeit, die nicht miteinander verbunden sind. Bestandes- und projektspezifische Kohlenstoffflüsse können nicht dargestellt werden. Wie sich die Kohlenstoffflüsse mit der Bewirtschaftungsart verändern, ist nicht berechenbar.

COMAP

Das COMAP-Modell (Comprehensive Mitigation Analysis Process) wurde im Lawrence Berkeley Laboratory 1995 entwickelt, um den CO₂-Speicher von Wäldern zu bestimmen. Es war ursprünglich dafür vorgesehen, den CO₂-Speicher in Plantagen zu simulieren. Es ist möglich, den Kohlenstoffvorrat von Beständen zu quantifizieren. Es handelt sich um ein Modell, mit dem der CO₂-Speicher stark vereinfacht und unabhängig von Böden abgeschätzt werden kann. Es ist nicht möglich, Rückkopplungen bei Feuer und anderen Ereignissen mit ihren Auswirkungen auf das künftige Wachstum zu simulieren. Zudem wird der CO₂-Speicher im Boden nicht be-

rechnet.

3.4.6 Methoden zur Ermittlung der Kohlenstoffvorräte in Böden

Für eine Modellierung der Kohlenstoffbilanz von Wäldern spielen die Böden eine entscheidende Rolle. /Weber, 1999/ hat anhand von Stichprobeninventuren die Bestandes- und Bodendaten für einen Nothofagus-Bestand auf Feuerland bilanziert. Der ermittelte Gesamtkohlenstoffvorrat beträgt 304 t C pro ha. Der lebende Bestand hat einen Anteil von mehr als 66%. Totholz trägt mit rund 11% bei. Die Bodenvegetation betrug im Untersuchungsgebiet etwa 0,4 t. Trotz der Flachgründigkeit der Standorte in Feuerland wurden mit 66 t C/ha vergleichsweise hohe Kohlenstoffvorräte im Boden gefunden /Weber, 1999/. Das sind rund 22% des gesamten Kohlenstoffvorrats.

In Mitteleuropa enthalten die Böden nach /Paulsen, 1995/ 2/3 bis 3/4 des biologischen Kohlenstoffvorrats. Bei Waldgebieten ist dieser Anteil geringer als auf offenen Flächen /Paulsen, 1995/. Derzeit laufen weitgehende Untersuchungen, welche die Kohlenstoffaustauschprozesse zwischen Böden und Umwelt für Europa ermitteln sollen /Carbo Europe, 2002/. Für die Kohlenstoffaustauschprozesse im tropischen Afrika liegen gemäß /Veldkamp, 2001/ wenige zuverlässige Daten vor. In der Literatur sind zwei grundsätzliche Methoden zur Berechnung des Bodenkohlenstoffs bekannt. Diese werden wie folgt charakterisiert:

- Zuordnung eines Vegetationstyps auf einen Bodentyp
- Hinzuziehen von Bodeneignungskarten

Der erste methodische Ansatz geht davon aus, dass bestimmte Vegetationen beziehungsweise Bestände charakteristische Böden aufweisen. Bei geringer Datenmenge ist diese Methode gut einsetzbar. Der entscheidende Nachteil ist jedoch, dass Bestandes- und Bodentypen eng zusammengehören und sich nicht trennen lassen. Das bedeutet, dass Bestandesänderungen auf einem Bodentyp nicht berücksichtigt werden können.

Der zweite methodische Ansatz wertet Böden anhand von Bodeneignungskarten aus. Das setzt eine getrennte Kartierung von Böden und Beständen voraus /Davidson, Lefebvre, 1993/. Andererseits lassen sich mit Bodeneignungskarten die Zusammenhänge von Boden- und Bestandestypen nicht berechnen /Paulsen, 1995/. Die Zusammenhänge von Böden und Beständen können berechnet werden, wenn beide Typen unaustauschbar miteinander verbunden bleiben, was in der Realität nicht der Fall ist. Der zweite methodische Ansatz wird näher beschrieben, weil Bestandestypen auf Bodentypen modellmäßig austauschbar sein sollen, um der Realität näher zu kommen.

Nachfolgend wird deshalb die Methode mit Bodeneignungskarten zur Berechnung der Kohlenstoffvorräte in Böden dargestellt, wie sie bereits in der Schweiz zum Einsatz kam. Zur Berechnung der Kohlenstoffvorräte von Böden müssen nach /Paulsen, 1995/ folgende Parameter bekannt sein:

- Mächtigkeit des Bodenprofils (m)
- Skelettgehalt (s) = Wurzeln im Boden
- Lagerungsdichte (r)
- Humusgehalt (h)

s , r und h sind Funktionen von m , so dass der organische Anteil im Boden V_0 mathematisch wie folgt formuliert werden kann /Paulsen, 1995/:

$$V_{Bo} = \frac{A}{\cos(\varphi)} \int_m^0 p(t) \cdot h(t) \cdot (1 - s(t)) dt \quad (3-8)$$

mit:

V_{Bo}	Anteil der organischen Substanz im Boden
A	Fläche
$\cos(\varphi)$	durchschnittliche Hangneigung
m	Mächtigkeit des Bodenprofils
s	Skelettgehalt (s) = Wurzeln im Boden
p	Profiltiefe
r	Lagerungsdichte
h	Humusgehalt
dt	Zeit

Die Parameter sind für jeden Bodentyp unterschiedlich. Sie lassen sich näherungsweise aus publizierten Bodenprofilen ermitteln. Die publizierten Werte können graphisch als Funktion der Profiltiefe dargestellt werden, so dass genaue empirische Mittelwerte für den benötigten Parameter erzeugbar sind /Paulsen, 1995/.

Die Gesteinsschicht wird in der Formel nicht betrachtet, da sich ihr Kohlenstoffgehalt mit verschiedenen Bestockungen nicht ändert. Die Gesteinsschicht verändert sich in 100 Jahren in der Regel nicht. Das entspricht dem Zeitraum, wie ihn das IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) anlegt. Das Verhältnis Bodenhumus zu Kohlenstoff kann gemäß /Davidson, Lefebvre, 1993/ immer mit dem Faktor 0,58 berechnet werden. Damit entspricht 1 t trockener Bodenhumus 0,58 t Kohlenstoff. Humusberechnungen sind wichtig, um CO_2 -Freisetzungspotenziale infolge von Landnutzungsänderungen zu berechnen.

Die von /Paulsen, 1995/ definierte Formel wurde für eine einmalige Inventur des Bodenkohlenstoffvorrates in der Schweiz entwickelt. Mit ihr kann die zeitliche Entwicklung der Kohlenstoffbilanz nicht prognostiziert werden. Neben einer zeitlichen Komponente sind unterschiedliche Bestände und Nutzungsformen auf dem jeweiligen Bodentyp zu berücksichtigen. Die Nutzungsform beeinflusst jedoch den Bodenkohlenstoffhaushalt durch Erosion oder Bodenzuwachs. Die Paulsen'sche Formel liefert für eine zeitpunktbezogene Berechnung zuverlässige Ergebnisse. Vergleichsrechnungen mit empirischen Untersuchungen von /Chidumayo, 1997/ zeigen, dass sich die Paulsen'sche Formel auch auf afrikanische Bodentypen

anwenden lässt und nur marginale Differenzen zu den empirisch erhobenen Daten bestehen.

In den folgenden Kapiteln werden Modellierungsansätze aus anderen wissenschaftlichen Zweigen untersucht, die für eine Abbildung von Waldsystemen prinzipiell auch in Frage kommen könnten.

3.5 System-Dynamics-Modelle

Mit Hilfe von System-Dynamics-Modellen möchte man tiefere Erkenntnisse über dynamische Wechselwirkungen von sozio-ökonomisch, ökologisch und technologisch zusammenhängenden Systemen gewinnen. In erster Linie wurde mit der Entwicklung von System-Dynamics-Modellen nicht beabsichtigt, quantitative Vorhersagen zukünftiger Entwicklungswege aufzuzeigen /Voß, 2002/. System-Dynamics-Modelle werden häufig in Blockschaltbildern strukturiert und sind bei kleineren Modellen rasch zu überblicken. Die Grundstruktur wird wesentlich durch verschiedene Zustandsgrößen beschrieben, welche materielle Ströme akkumulieren. Sie füllen oder leeren den Vorrat.

Das mathematische Lösen von kontinuierlichen System-Dynamics-Modellen erfolgt durch nichtlineare Differenzialgleichungen. Die Differenzialgleichungen werden in Differenzgleichungen umgeschrieben. Durch numerische Integrationsverfahren werden die Differenzgleichungen zur Simulation verwendet. Die numerische Simulation von System-Dynamics-Modellen kann mit vielen Programmiersprachen durchgeführt werden.

Zur Simulation von System-Dynamics-Modellen wurde beispielweise die Programmiersprache Stella entwickelt /Voß, 2002/. Aus den Modellen lassen sich Informationen für die Zukunft gewinnen. System-Dynamics verwendet die Szenariotechnik, um Ergebnisse abzusichern. Jedes Szenario muss allerdings mit einem neuen Modelllauf berechnet und separat gespeichert werden.

System-Dynamics-Modelle sind zur Quantifizierung und Zukunftsprojektion von dynamischen Systemen geeignet. Sie liefern Aufschlüsse über Wechselwirkungen komplexer Systeme. Die Systemstrukturen sind in der Regel leicht zu verändern. Allerdings steigt der Zeitaufwand für die Veränderung mit zunehmendem Detaillierungsgrad sehr stark an. Mit System-Dynamics sind detaillierte Modelle nicht zu berechnen, weil zu viele Gleichungsspezifikationen erforderlich sind, um den erforderlichen Detaillierungsgrad, wie er beispielweise für eine Kohlenstoffbilanzierung von Wäldern erforderlich ist, zu erreichen. Das hängt damit zusammen, dass Wachstumsprozesse vom Boden und Standort, von der Höhenlage, dem Klima und von Pflege- und Durchforstungsmaßnahmen abhängen. Diese Abhängigkeiten gelten für jeden einzelnen Bestand. Durch geringfügige Veränderungen im Lebenszyklus eines Bestandes ergeben sich unüberschaubar viele Gleichungsspezifikationen, die mit der Systems-Dynamics-Methode nicht mehr zu überblicken sind. Das System lässt sich entweder nur stark vereinfacht abbilden und ist für die CO₂-Bilanzierung von Wäldern ungeeignet, oder es ist bei einem hohen Detaillierungsgrad nicht mehr nachvollziehbar.

3.6 Modellbildung mit zellulären Automaten

Ein weiterer Ansatz, die zeitliche Entwicklung komplexer Systeme zu erfassen, stellen die sogenannten zellulären Automaten dar. Als geistige Väter der zellulären Automaten gelten von Neumann und Ulam /Hasslacher, 1987/.

Heutzutage werden zelluläre Automaten beispielsweise zur Simulation verschiedener Selbstorganisationsprozesse verwendet. Zelluläre Automaten bieten vielfältige Möglichkeiten, um natürliche Prozesse zu modellieren, die weit über die bisherigen Anwendungen hinausgehen dürften. So haben die zellulären Automaten einen wesentlichen Beitrag bei der Entwicklung der Spieltheorie in der Mathematik geleistet. Zelluläre Automaten wurden entworfen, um die miteinander verwobenen Aktivitäten zahlreicher Teilsysteme zu beschreiben /Gerhard, Schuster, 1995/. Mit zellulären Automaten lassen sich komplexe Interaktionsgeschehen abstrakt erfassen. Sie beschreiben Wechselwirkungen beliebig vieler Teilkomponenten. Die Teilkomponenten folgen den gleichen Regeln und können sich mit ihrer unmittelbaren lokalen Nachbarschaft wechselseitig austauschen.

Die zellulären Automaten bilden eine Netzstruktur, deren Elemente aus einzelnen Zellen bestehen. Es handelt sich um identische Zellen mit bestimmten Eigenschaften, die regelmäßig angeordnet sind /Allouche, Courbage, Skordev, 2000/. Die Anordnung der Zellen kann sowohl rechtwinklig als auch hexagonal sein. Die Überdeckung eines Raumes mit gleichen Zellen impliziert immer eine Gitterstruktur und damit eine Anisotropie beziehungsweise eine Richtungsabhängigkeit /Zuse, 1975/. Das heißt, dass die Berechnung immer von einer Startzelle ausgeht und anschließend alle Zellen bis zur letzten abhängigen Zelle berechnet werden. Zelluläre Automaten sind absolut diskret /von Neumann, 1966/, /Krause, Neumann, 1999/. Die Zellen können eine endliche Art von Zuständen annehmen. Es gibt damit genau n Zustände, die eine Zelle annehmen kann und die durch den Modellierer bestimmt werden können. Ihr Zustand hängt gemäß /von Neumann, 1966/ vom Zustand der benachbarten Zelle ab. Es gibt immer Vorzugsrichtungen, die durch die Struktur des Gitters vorgegeben sind. Neben der räumlichen Struktur des Gitters ist der Zeitablauf diskret. Nach Ablauf eines terminierten diskreten Zeitintervalls werden für alle Zellen neue Werte bestimmt /Gerhard, Schuster, 1995/. Der Zustand der Zellen ergibt sich dabei aus dem Zustand der benachbarten Zellen oder dem letzten Zustand der eigenen Zelle /Allouche, Courbage, Skordev, 2000/. Zelluläre Automaten können als vollständig diskretisiertes System aufgefasst werden. Die Evolution des Systems vollzieht sich in diskreten Zeitschritten mit dynamischen Streuregeln. Durch möglichst einfache Streuregeln soll die Dynamik auf eine makroskopische Ebene gebracht werden können /Rein, 1995/. Die Streuregeln können deterministisch oder probabilistisch sein /Rein, 1995/.

Zelluläre Automaten haben in Anlehnung an /Gerhard, Schuster, 1995/ fünf charakteristische Eigenschaften, die nachfolgend beschrieben werden:

Geometrie oder Zellraum: Geeignet ist jede Zellanordnung, die den Raum gleichmäßig überdeckt. Zelluläre Automaten können ein-, zwei- oder dreidimensional sein.

Nachbarschaft: Die sogenannte „von Neumann-Nachbarschaft“ berücksichtigt im zweidimensionalen Zellraum die vier nächsten direkt angrenzenden Zellen. Die sogenannte „Moore-Nachbarschaft“ bezieht auch die diagonalen Zellen mit ein, also acht.

Zustandsmenge und -raum: Jede Zelle kann nur eine endliche Anzahl von Zuständen annehmen. Minimum sind zwei Zustände.

Regeln und Randbedingungen: Die Bestimmung des neuen Wertes einer Zelle folgt festen Regeln. Sie ist für alle Zellen identisch. Zum Beispiel kann eine Zelle immer den Wert des linken Nachbarn annehmen.

Spielregeln zellulärer Automaten: Sie hängen neben der Zahl der Zellzustände von der Größe der Nachbarschaft ab. Sind k Zustände und n Zellen in ihrer Nachbarschaft gegeben, so gibt es k^n mögliche Spielregeln. Selbst für binäre Automaten mit $Z = \{0,1\}$ wächst diese Zahl bei größeren Nachbarschaften an, so dass man sie nicht mehr systematisch untersuchen kann. Mit einer Moore-Nachbarschaft ($n=9$) gibt es 10.154 Kombinationsmöglichkeiten /Gerhard, Schuster, 1995/. Deshalb wurde bisher nur ein kleiner Teil von denkbaren Entwicklungsregeln zellulärer Automaten untersucht.

Mit zellulären Automaten lassen sich in erster Linie qualitative Abbildungen des realen Systems darstellen. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde auch geprüft, ob quantitative Berechnungen des Systems möglich sind, wenn die Regeln, mit denen voneinander abhängige Zellen berechnet werden sollen, in einer Datenbank oder der Zelle hinterlegt werden. Es zeigte sich, dass die Zeit, in der die Entwicklung ablaufen soll, ebenfalls bestimmt werden kann. Das ist sehr wichtig, um mit zellulären Automaten komplexe Modelle zu entwickeln. Allerdings stellte sich gleichfalls heraus, dass mit dieser Modellbildung nur eine einzige Modellperiode abgebildet werden kann.

Für eine Modellierung von Energie- und Waldsystemen ist die Betrachtung von sehr langen Zeiträumen (in der Regel Jahrzehnte) erforderlich, um den Entwicklungstrend des Energieträgerverbrauchs und die Waldentwicklung darstellen zu können. Für die Eingabe von Parametern durch den Planer ist zudem die Unterteilung in einzelne Modellperioden notwendig. Bei der weiteren Analyse der Struktur und Funktionsweise zellulärer Automaten gelang es, die Modellierungszeit mit Modellperioden zu unterteilen. Mit Hilfe der Programmierung wurde systemtechnisch die einmal definierte Struktur zur vereinfachten Abbildung der Realität reproduziert und miteinander verknüpft. Die Anzahl der Reproduktionen der Struktur richtet sich nach der erforderlichen Zeitauflösung der Modellperioden innerhalb der Modellierungszeit.

Aufgrund der zuvor beschriebenen Fähigkeiten von zellulären Automaten wurde unter-

sucht, ob zelluläre Automaten zur Abbildung der Realität von Waldsystemen eingesetzt werden können. Gleichzeitig wurde untersucht, wie zelluläre Automaten beispielsweise unterschiedliche Wachstumsraten über ein und dieselbe Zelle abbilden können. Anschließend wurde geprüft, wie eine solche Struktur aussehen muss, um Waldsysteme hinreichend genau (das heißt mit gleichem Abstraktionsgrad wie die Abbildung des Energiesystems) abzubilden und wie die einzelnen Strukturen über die Modellperioden miteinander verknüpft werden können. Es zeigte sich, dass hierfür eine Weiterentwicklung der zellulären Automaten notwendig ist.

Im Rahmen der Untersuchung wurde zudem festgestellt, dass sich zelluläre Automaten hervorragend mit Excel-VBA (Visual Basic for Applications) programmieren lassen, weil mit den Zellen ein Raum gleichmäßig zweidimensional überzogen werden kann. Alle Zellen in Excel lassen sich gleich groß formatieren. Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass Excel das Analyseinstrument von MESAP ist. Es wurde auch getestet, wie zelluläre Automaten in das RES integriert werden können. Es zeigte sich, dass sie in das RES wie ein Gut integriert werden können, wenn solche Zellen in Excel nicht zur Analyse von Daten, sondern zum Schreiben von Werten in die MESAP-Datenbank genutzt werden. Solche Zellen können somit durch die zellulären Automaten berechnet werden und sind trotzdem in das RES integriert. Da eine Kohlenstoffbilanzierung in Wäldern auch von Wachstumsraten abhängt, kann vermutet werden, dass die Integration von zellulären Automaten in ein RES eine detaillierte Quantifizierung ermöglicht. Aus diesen Gründen liegt es nahe, Waldsysteme auf der Basis von zellulären Automaten zu entwickeln und in MESAP Excel (Analyst) systemtechnisch zu integrieren, wie in Kapitel 4 ausführlich beschrieben wird.

3.7 Notwendigkeit einer integrierten Energie- und CO₂-Bilanzierung

Die Notwendigkeit der integrierten Modellierung liegt darin, dass Energie- und Waldsysteme über Prozessketten miteinander verknüpft sind, die je nach Szenario unterschiedliche Emissionen im Gesamtsystem freisetzen. Eine Strategie mit einzelnen Maßnahmen im Energie- und Waldsystem wird bei einer getrennten Modellierung an der Schnittstelle von Energie- und Waldsystem geteilt. Die Schnittstelle kann beispielsweise die Holzernte sein. Da die Art der Holzernte (Kahlschlag, Durchforstung, einzelbaumweise Nutzung) erhebliche Einflüsse auf die Weiterentwicklung von Beständen hat, wirken sich Veränderungen in der Holzernte auf das Zuwachsverhalten und damit die Kohlenstoffbilanz von Beständen aus. Bei einer Durchforstung von Beständen wird der jährliche Zuwachs auf weniger Bäume pro Flächeneinheit verteilt. Für eine optimale Zuwachssteigerung ist es notwendig, dass weder zu stark noch zu schwach in den Bestand eingegriffen wird, damit die Bäume die Fotosynthese möglichst optimal umsetzen können. Die verbleibenden Bäume können den Eingriff durch höheren Zuwachs kompensieren. Die geernteten Bäume aus der Durchforstung können den Marktanteil von fossilen Energieträgern reduzieren. Im Modell kann der Marktanteil eines fossilen Energieträgers als sogenannter Residual gewählt werden, der die Differenz zu 100% Marktanteil auffüllt.

Eine getrennte Modellierung von Energie- und Waldsystemen führt dazu, dass unterschiedliche Szenarien mit ihren Auswirkungen auf die Kohlenstoffbilanz addiert werden. Maßnahmen im Energie- und Waldsystem sind jedoch auf Grund der Verkettung von Prozessen im Gesamtsystem voneinander abhängig. Es ist daher davon auszugehen, dass die Bilanzsumme beider Systeme nicht zwingend der Summe im Gesamtsystem entspricht. Das liegt daran, dass Strategien mit entsprechenden Maßnahmen in einem System unmittelbare Auswirkungen auf die Kohlenstoffbilanz des anderen Systems haben können. Die Summe aller CO₂-Minderungsmaßnahmen im Energie- und Waldsystem kann ungleich der CO₂-Minderungen einer Strategie mit allen Maßnahmen i bis n im Gesamtsystem sein. Diese Behauptung wird nachfolgend untermauert. Mathematisch lässt sich die Verkettung der Prozesse im Energie- und Waldsystem durch die Ungleichung (3-10) erklären. Im Allgemeinen gilt:

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) \neq \sum_{i=1}^n f(x_1, x_2, \dots, x_n) \Big|_{x_i = \text{const}, x_j = 0 \quad \forall j \neq i} \quad (3-9)$$

Die Funktion $f(x)$ der Durchführung von n Maßnahmen ist ungleich der Summe der Anwendung von jeweils einer Maßnahme, während die anderen Maßnahmen konstant bleiben. Das folgende einfache Rechenbeispiel geht von drei Maßnahmen aus:

- Substitution von Holz durch Gas oder Elektrizität in den Haushalten
- Feuerkontrolle im Wald
- Verbesserung der Ernteverfahren von Holz

Im Beispiel bedeuten die Maßnahmen, dass auf Grund des geringeren Holzverbrauchs in Folge der Substitution von Holz durch Gas sowie durch verbesserte Ernteverfahren Bestände geschont werden. Das bedeutet, dass die Feuerkontrolle im Wald intensiviert werden muss beziehungsweise mehr Holz dem Feuer zum Opfer fällt.

Für das Beispiel soll folgende binäre Logik gelten:

x	
0	nicht durchgeführte Maßnahme
1	durchgeführte Maßnahme

$$f(x_1, x_2, x_3) \neq f(x_1, x_2 = \text{const}, x_3 = \text{const}) + f(x_1 = \text{const}, x_2, x_3 = \text{const}) + f(x_1 = \text{const}, x_2 = \text{const}, x_3) \quad (3-10)$$

$$f(1, 1, 1) \neq f(1, 0, 0) + f(0, 1, 0) + f(0, 0, 1)$$

damit ist $1 \neq 0$

Durch dieses einfache Beispiel wird gezeigt, dass eine getrennte CO₂-Bilanzierung von Energie- und Waldsystemen ungleich der Summe im Gesamtsystem sein kann.

Ein weiteres Beispiel verdeutlicht die Notwendigkeit einer systemübergreifenden Bilan-

zierung in Entwicklungsländern. Durch verstärkten Einsatz von Bioenergieträgern können die CO₂-Emissionen gesenkt werden, was allerdings ausschließlich für die nachhaltige Bewirtschaftung von Wäldern gilt. Werden Holzressourcen übernutzt, fehlen die entsprechenden Ressourcen im Energiesystem, für das nun verstärkt andere Energieträger herangezogen werden müssen, weil Holzressourcen unter Umständen gar nicht mehr verfügbar sind. Die Holznutzung beeinflusst damit direkt die zukünftige Kohlenstoffbilanz des Waldes. Diese Bilanz lässt sich nur über ein Gesamtmodell bestimmen, weil durch stärkere Eingriffe in den Bestand die Wachstumsraten nicht zwingend verringert werden, aber die Kohlenstoffbilanz sich stark verändern kann. Erosionsschutz und Durchforstungsmaßnahmen zur Stabilisierung von Boden und Bestand haben komplementäre Einflüsse auf das zukünftige Wachstum und können daher nicht einfach addiert werden. Das liegt daran, dass der Bestand durch die Durchforstung zunächst labiler wird und der Erosionsschutz abnimmt, weil weniger Bäume auf der Fläche stehen bleiben und damit der Boden für Wind- und Wassererosion anfälliger wird. Durch Humusschwund werden zusätzliche Emissionen aus dem Boden frei. Außerdem werden dem Bestand Nährstoffe entzogen.

Aus Kapitel 3 ergeben sich drei wesentliche Einschränkungen für die Abbildung von Energie- und Waldsystemen über ein Gesamtsystem:

- Entweder sind Waldmodelle nicht an Energiemodelle angebunden oder die Systeme können für eine CO₂-Bilanzierung nur stark vereinfacht abgebildet werden
- Regionale Waldmodelle und Bestandesmodelle sind im Allgemeinen nicht miteinander verknüpft
- Die Darstellung des Zusammenwirkens von Böden und Beständen fehlt

Kapitel 3 zeigt, dass sich die Kohlenstoffbilanzen in Waldsystemen mit vorhandenen Methoden vereinfacht modellieren lassen. Allerdings steigt die Komplexität bei der Fragestellung zur Quantifizierung von Kohlenstoffvorräten in Wäldern gegenüber anderen Waldwachstumsprognosen an, weil Bodenkunde, Waldbau und Waldwachstumskunde miteinander verknüpft werden müssen. Grundlage für die Modellbildung einer Kohlenstoffbilanzierung ist daher ein Waldwachstumsmodell, das neben dem gesamten oberirdischen Bestand auch den Boden mit den Wurzeln modellieren kann. Die Wechselwirkungen durch die Nutzungsart zwischen Beständen und Böden müssen ebenfalls berücksichtigt werden können.

Die Herausforderung der vorliegenden Arbeit besteht damit in der Entwicklung eines Waldmodells, mit der sich die CO₂-Bilanz von Beständen auf verschiedenen Böden modellieren lässt. Zudem ist es erforderlich, das Waldmodell so aufzubauen, dass es an MESAP angeknüpft werden kann.

In Kapitel 4 werden die methodischen Weiterentwicklungen vorgestellt, die für eine systemübergreifende Energie- und Kohlenstoffbilanzierung von Energie- und Waldsystemen im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführt wurden.

4 Entwicklung einer systemübergreifenden Energie- und CO₂-Bilanzierung

Um die Energie- und CO₂-Bilanz von Energie- und Waldsystemen zusammenhängend modellieren zu können, wird auf der Basis von MESAP 4 eine systemübergreifende Modellierungsmethode entwickelt. Im ersten Schritt wird das Waldsystem in ein Referenzenergiesystem (RES) eingeordnet und eine qualitative Strukturierung des Gesamtsystems vorgenommen, um die Schnittmenge beider Systeme mit ihren Systemgrenzen zu beschreiben. Da im Waldmodell der zur Verfügung stehende Raum eine wesentliche Auswirkung auf den Holzbestand hat, muss der Austausch von räumlich-zeitlichen Daten in die MESAP-Datenbank integriert und verwaltet werden. Die räumlich-zeitlichen Beziehungen von Waldsystemen werden durch eine Erweiterung der RES-Struktur mit zellulären Automaten realisiert. Sie dienen außerdem einer erweiterten Strukturierung des Modells, um qualitative Wechselwirkungen im Waldsystem quantifizierbar zu machen. Auf dieser Basis wird das neue mathematische Modell NATURE formuliert, welches die CO₂-Bilanz von Wäldern beschreiben und quantifizieren kann. Um eine Bilanzierung der Einzelsysteme zu ermöglichen, werden sowohl die mathematischen Modellschnittstellen als auch die Schnittstellen im RES definiert. Das Kapitel schließt mit der Formulierung der systemübergreifenden Energie- und Kohlenstoffbilanzierung.

4.1 Qualitative System- und Modellbeschreibung

In diesem Abschnitt wird das Waldsystem im RES in das Gesamtsystem eingeordnet. Dies ist im Überblick der Abbildung 4-1 beispielhaft veranschaulicht. Energie- und Waldsystem sind in der vorliegenden Arbeit Teile des Gesamtsystems.

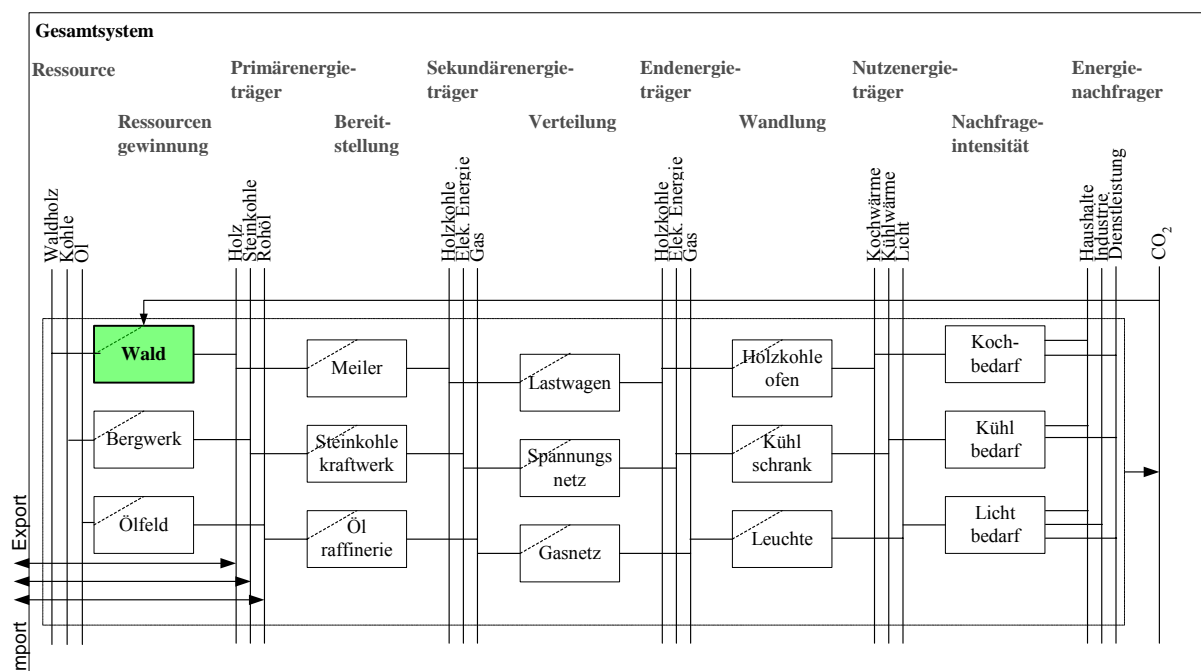


Abbildung 4-1: RES-Aufbau - Einordnung des Waldsystems in ein Gesamtsystem

Das stark vereinfachte RES zeigt die Umwandlungsketten von den Ressourcen Wald, Kohle und Öl bis zu den Nutzenergieträgern Kochwärme, Kühlwärme und Licht. Auf der Nachfrageseite bestimmen Haushalte, Industrie und Gewerbe den Energiebedarf für Kochen, Kühlen und Licht. Die erforderliche Koch- und Kühlwärme sowie Licht werden aus Holzkohle, Strom und Gas über Holzkohleöfen, Kühlschränke und Leuchten umgewandelt. Die Endenergieträger sind die verteilten und transportierten Sekundärenergieträger im System. Die Sekundärenergieträger werden über verschiedene Bereitstellungsprozesse aus den Primärenergieträgern gewonnen. Aus diesen Ketten ergibt sich die Nutzung der jeweiligen Ressourcen. Primärenergieträger können zudem in das System importiert oder aus dem System exportiert werden. Die Energieressourcen werden damit direkt durch den Verbraucher beeinflusst. Da sich Steinkohle (aus den Bergwerken) und Öl (von den Ölfeldern) nur in geologischen Zeiträumen unter hohem Druck entwickeln, kommt es bei jeder Entnahme zu einer Ressourcenverringerung. Der Wald hingegen regeneriert sich in menschlichen Zeitmaßstäben und wird daher auch als sogenannte „re-zente Ressource“ definiert. Eine CO₂-Aufnahme und -Abgabe findet innerhalb kurzer Zeiträume statt. Dies unterscheidet Wald- und Agrarsysteme von fossilen Ressourcensystemen bei der Berechnung der CO₂-Bilanz.

Energiesystem *ES* und Waldsystem *WS* beeinflussen sich in ihrer CO₂-Bilanz wechselseitig, weil der eingesetzte Energiemix im Energiesystem den Kohlenstoffhaushalt im Waldsystem mitbestimmt. Wird beispielsweise weniger Holz verbraucht, hat dies unmittelbare Auswirkungen auf das Wachstum eines Waldbestandes (Bestand). Es entsteht eine gemeinsame Schnittmenge, die beide Subsysteme logisch miteinander verbindet. Die Vereinigung beider Systeme sind die Mengen $WS \cup ES = \{x \mid x \in WS \text{ oder } x \in ES\}$. Die Struktur ist in Abbildung 4-2 dargestellt.

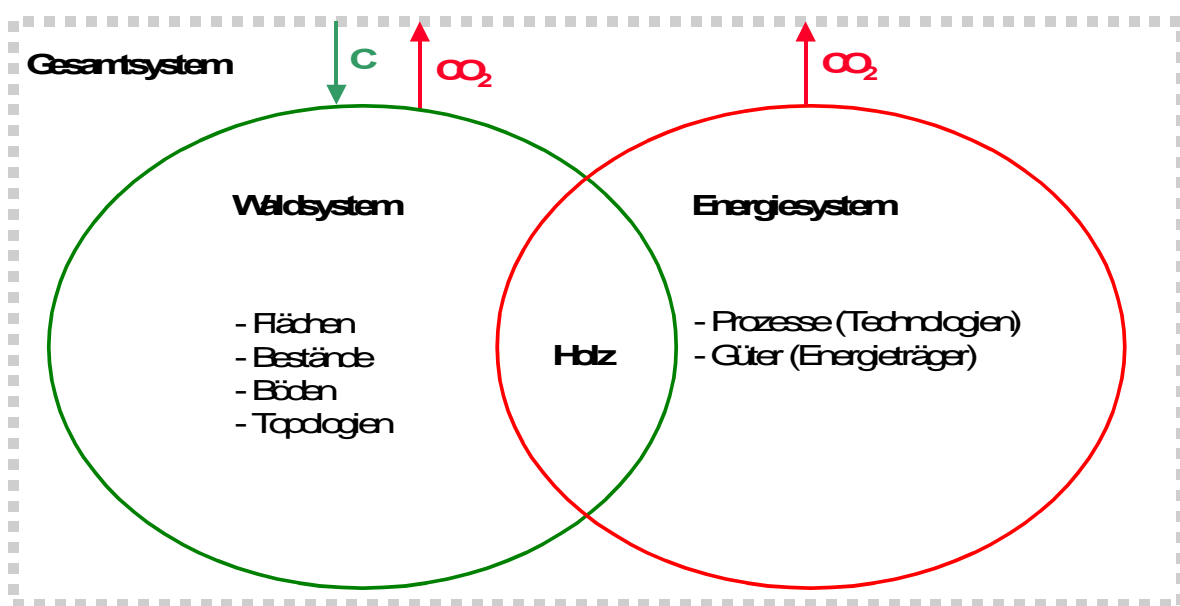


Abbildung 4-2: Struktur von Energie- und Waldsystem

Die gemeinsame Schnittmenge besteht im Austausch des Primärenergieträgers Holz. Im Energiesystem werden Energieträger über Prozesse in andere Energieträger umgewandelt sowie CO₂-Äquivalente freigesetzt. Im Waldsystem ohne die Schnittmenge wird vor allem Holz erzeugt. Im Waldsystem werden ober- und unterirdisch sowohl Kohlenstoff (C) gespeichert als auch CO₂-Äquivalente freigesetzt. Vor allem Katastrophen können eine wesentliche Rolle im CO₂-Haushalt spielen. Zu den Katastrophen zählen alle Ereignisse, bei denen Wald vernichtet wird, ohne den Menschen zu nutzen. Bedeutende Ereignisse für die CO₂-Bilanz sind vor allem Waldbrände. Da sie auch von der Nutzung durch Menschen beeinflusst werden, werden Waldbrände über die Schnittmenge bilanziert.

Die CO₂-Bilanz im Waldsystem hängt maßgeblich vom Zuwachs und Verlust von Holz und außerdem vom Boden ab. In der Modellierungszeit kann sich die jährliche CO₂-Bilanz im Waldsystem stark unterscheiden, je nachdem wie stark in den Wald eingegriffen wird. Eine Nettokohlenstoffbindung erfolgt nur, wenn der jährliche Zuwachs größer ist als der jährliche Verlust von Holz und Boden. Übernutzte Waldsysteme können erst dann wieder eine Nettokohlenstoffbindung aufweisen, wenn sie solange nicht mehr genutzt werden, bis sie sich regenerieren konnten. Dies setzt allerdings voraus, dass zumindest günstige klimatische Verhältnisse, genügend Wasser und ausreichend lange Vegetationszeiten existieren. Die CO₂-Bilanz im Waldsystem wird damit maßgeblich durch den jährlichen Holzbedarf des Energiesystems mitbestimmt. Die Holzbereitstellung beginnt mit der Ernte im Wald und endet in der Regel beim Transport zum Verbraucher. Damit kann nur im Waldsystem CO₂ gespeichert werden. Falls der Wald mehr CO₂-Emissionen binden kann als über das Gesamtsystem freigesetzt wird, besteht gemäß $WS / ES = \{x \mid x \in WS \text{ und } x \notin ES\}$ eine Differenz zweier Mengen (CO₂-Speicherung und CO₂-Freisetzung). Der Wald fungiert in diesem Fall als Senke im Gesamtsystem. Es ist jedoch sehr unwahrscheinlich, dass Wälder die freigesetzten CO₂-Emissionen aus dem Gesamtsystem aufnehmen können. Die Frage ist daher, ob der Wald unter Beeinflussung durch das Energiesystem eine Senke sein kann, wenn der Holzabfluss nicht dem Wald bilanzmäßig gutgeschrieben wird. Dann gilt, dass die Differenzmenge WS / ES von zwei Mengen WS und ES die Menge CO₂ ist, die zu WS , aber nicht zu ES gehört.

Die Elemente des Gesamtsystems sind nicht nur untereinander, sondern auch mit der Umwelt wechselseitig verbunden. Die Wechselwirkungen bestehen im Holzaustausch vom Wald- ins Energiesystem und im CO₂-Austausch im Gesamtsystem. Die resultierenden Systemgrenzen im Modell werden im nächsten Abschnitt beschrieben.

4.1.1 Systemgrenzen und Realitätsausschnitt

Die Systemgrenzen zur Energie- und Kohlenstoffbilanzierung in der vorliegenden Arbeit sind geographisch, technisch und zeitlich ausgeprägt. Die Wirtschaftlichkeit wird nicht analysiert, weil sie für die Energie- und Kohlenstoffbilanzierung des betrachteten Realitätsausschnitts nicht zwingend erforderlich ist.

Die *geographischen Grenzen* markieren drei Landnutzungen einer Region. Im Modell sind das Siedlungs- sowie Wald- und Agrarflächen. Sie bilden die Gesamtfläche, die in der Modellierungszeit gleich groß bleibt. Die drei Landnutzungen konkurrieren miteinander um die Flächenanteile. Die Flächenanteile können sich mit der Zeit verschieben. Die Landnutzung ändert sich dort, wo beispielsweise Städte gebaut, Agrarflächen aufgeforstet oder Wälder gerodet werden. Durch den Städtebau und durch fortschreitende Landwirtschaft weichen Waldflächen in vielen Entwicklungsländern zurück. Gehen Waldflächen verloren, sinkt der Holzertrag, weil die Produktivität mit waldbaulichen Maßnahmen nur langfristig gesteigert werden kann. Kurzfristig können zur Steigerung der Produktivität Plantagen gepflanzt werden. Das hat jedoch den gravierenden Nachteil, dass in der Regel die Biodiversität zurückgeht und Schädlinge die Plantagen vernichten können. Pflanzenschutzmaßnahmen sind meistens teuer und gesundheitlich bedenklich. Aus diesen Gründen ist die zur Verfügung stehende Fläche ein limitierender Faktor im System. Während landwirtschaftliche Fläche wieder in Wald übergehen kann, sind Siedlungsflächen für den Wald zumeist unwiederbringlich verloren. Die qualitative Aufteilung der Flächen ist in Abbildung 4-3 dargestellt.

Gesamtfläche

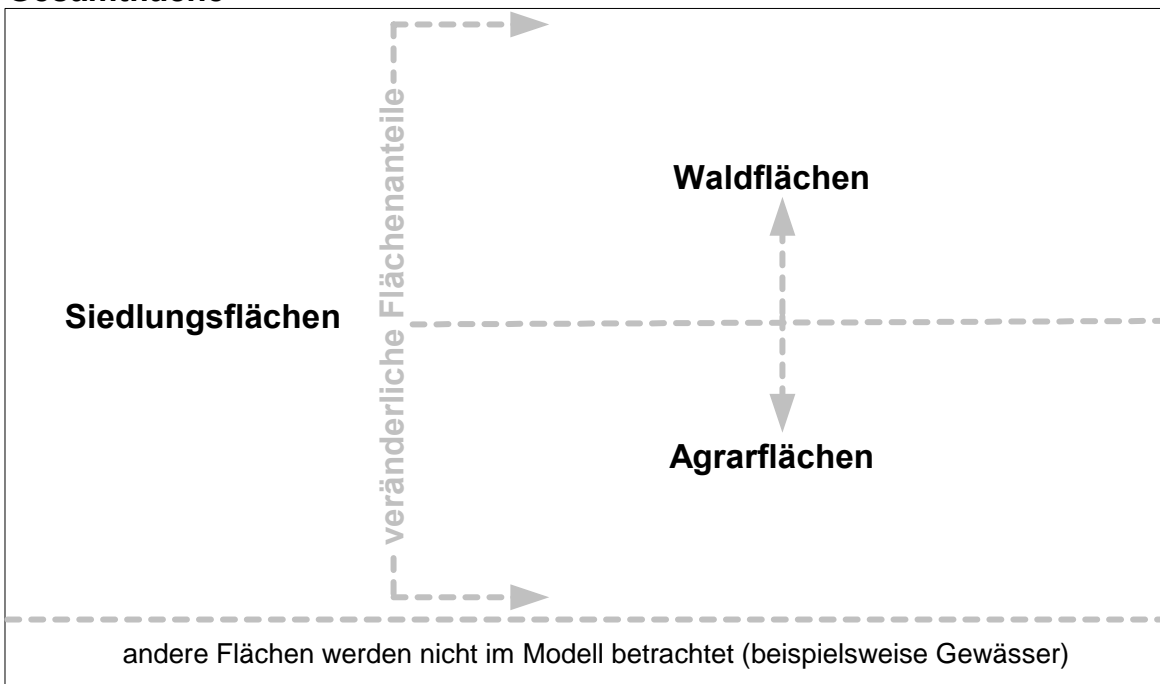


Abbildung 4-3: Qualitative Aufteilung der Flächen im Gesamtsystem

Moore und Gewässer werden nicht betrachtet, weil sie in der Regel weder für den Städtebau noch für die Forst- und Agrarwirtschaft geeignet sind.

Die Gesamtfläche des betrachteten Realitätsausschnitts einer Region A_G ergibt sich aus den Siedlungs- A_S und den Agrar- A_A und Waldflächen A_W . Die Gesamtfläche A_G ist konstant, während die Flächenverhältnisse von A_S , A_A und A_W variabel über die Modellierungszeit sind.

$$AG = \sum_{i=1}^n AW_i + \sum_{j=1}^m AA_j + \sum_{k=1}^o AS_k \quad (4-1)$$

mit:

AG	Fläche einer Region (im Modell konstant)
AS	versiegelte Flächen (im Modell variabel)
AW	Waldflächen (im Modell variabel)
AA	Agrarflächen (im Modell variabel)
<i>i</i>	Index der Waldflächen <i>i</i> = 1,..., <i>n</i>
<i>j</i>	Index der Agrarflächen <i>j</i> = 1,..., <i>m</i>
<i>k</i>	Index der versiegelten Flächen <i>k</i> = 1,..., <i>o</i>

Über die flexible Zuordnung der Flächenanteile ist gewährleistet, dass räumliche Nutzungsänderungen modellmäßig berücksichtigt werden können.

Die *technischen Systemgrenzen* im Energiesystem sind durch die holzverbrauchenden Sektoren charakterisiert. Das Waldsystem ist naturwissenschaftlich charakterisiert. Die CO₂-Bilanz wird durch die folgenden technischen und naturwissenschaftlichen Faktoren beeinflusst:

	charakterisiert durch:	CO ₂ -Bilanz beeinflusst durch:
Energiesystem	<ul style="list-style-type: none"> - Haushalte - Industrie - Gewerbe - Dienstleistung - Energieerzeugung 	<ul style="list-style-type: none"> - Brennstoffe - Wirkungsgrade - Nutzungsgrade
		<ul style="list-style-type: none"> - berücksichtigte CO₂-Äquivalente - Ernteverfahren und Bewirtschaftung
Waldsystem	<ul style="list-style-type: none"> - Topographien - Böden - Bestände mit Baumarten, Altersklassen - Flächen einschließlich Freiflächen 	<ul style="list-style-type: none"> - klimatische Verhältnisse - Erosionsprozesse - Zuwachs- und Zerfallprozesse - Humusschwund

In die Bilanz werden alle Primärenergieträger einbezogen, die jetzt oder zukünftig für das Energiesystem eine Bedeutung haben können. Der Haushaltssektor hat in vielen Entwicklungsländern den größten Anteil am Holzverbrauch in Form von Nutzenergieträgern. Alle holzverbrauchenden Sektoren werden bis zum Verbrauch von Nutzenergieträgern einbezogen.

Die technischen Grenzen im Waldsystem liegen in den Ernteverfahren, den einzelnen Bewirtschaftungsverfahren sowie den Wachstums- und Zerfallsraten von Beständen und Böden. Die Wirkungsgrade in den Systemen werden von verschiedenen Umwandlungs- oder Ernte-

technologien und Waldwachstumsraten bestimmt. Die Berechnung der Emissionen wird auf die drei mengenmäßig wichtigsten Treibhausgase CO₂, N₂O und CH₄ konzentriert. Beim Transport wird mit durchschnittlichen Entfernungen von der Ressourcennutzung bis zum Verbraucher gerechnet.

Die *zeitlichen Systemgrenzen* werden durch die Modellierungszeit und die einzelnen Modellperioden bestimmt. Sie reichen so weit in die Vergangenheit, dass ein Trend aus der Vergangenheit erkennbar ist. Für die vorliegende Arbeit ist das der Zeitpunkt 1990. Er stellt gleichzeitig den Bezugszeitpunkt für Maßnahmen im Kioto-Protokoll dar. Das Ende der Modellierungszeit wird aus zwei Gründen auf das Jahr 2020 festgesetzt. Erstens werden die Unsicherheiten mit zunehmender Zukunftprojektion größer. Zweitens ist der modellierte Zeitraum als Grundlage für eine spätere Bewertung im Rahmen von Klimaschutzmechanismen geeignet, deren Verpflichtungen derzeit auf das Jahr 2012 begrenzt sind; eine Verlängerung ist jedoch nicht auszuschließen. Über die 30-jährige Modellierungszeit wird die jährliche Zeitauflösung gewählt. Sie ist geeignet, um verschiedene Maßnahmen zu unterschiedlichen zeitlichen Abständen einzuführen. Eine geringere Zeitauflösung von Tagen, wie es beispielsweise in der Kraftwerkseinsatzplanung erforderlich ist, ist aufgrund der trägen Reaktion des betrachteten Gesamtsystems nicht sinnvoll, da sich hier keine schlüssigen Veränderungen ablesen lassen. Längere Modellperioden erscheinen nicht sinnvoll, da für zufällige Ereignisse, wie Sturm und Waldbrand, jährliche Eintrittswahrscheinlichkeiten berechnet werden, mit der eine Region heimgesucht wird.

4.1.2 Strukturierung der Modellbildung

Zur Strukturierung der Modellbildung wird ein Land in seine verschiedenen Regionen aufgeteilt. Für die vorliegende Arbeit bilden Regionen eigenständige räumliche Objekte, da sie eine geographische und politische Einheit bilden und offene Systeme darstellen.

Die Siedlungen werden in Städte und Dörfer eingeteilt. Diese Unterteilung wird vorgenommen, weil die meisten Dörfer in Entwicklungsländern auch zukünftig nicht an ein Elektrizitäts- oder Gasnetz angeschlossen sein dürften und weiterhin stark von der Brennholznutzung abhängig sein werden.

Das Waldsystem wird gemäß Abbildung 4-4 strukturiert. Die Wald- und Agrarflächen werden topographisch eingeteilt. Über die Topographie lassen sich klimatische Bedingungen auf verschiedenen Höhenlagen für das Bestandeswachstum berücksichtigen. Die Topographie ändert sich normalerweise nur in geologischen Zeiträumen und kann im Modellierungszeitraum als unveränderlich angenommen werden. Aus diesem Grund wird für die Modellierungszeit angenommen, dass sich die Kohlenstoffbilanz der Topographie nicht ändert. Es wird unterstellt, dass der Kohlenstoff in der Lithosphäre (Gesteinsschicht) gebunden bleibt.

Jede Topographie wird wiederum in verschiedene Böden eingeteilt. Im Modell wird da-

von ausgegangen, dass sich die Böden nicht ändern. Es wird allerdings berücksichtigt, dass die Böden dynamischen Zuwachs- oder Erosionsprozessen unterliegen, wodurch sich die Kohlenstoffbilanz der Böden erheblich verändern kann. Die Böden müssen unterschieden werden, weil das Bestandeswachstum auf verschiedenen Böden variiert.

Bestände setzen sich aus einer oder mehreren Baumarten zusammen. Bestände unterscheiden sich durch ökologische Kriterien, dem ökonomischen Wert (Brennholz, Bauholz, Furnierholz) und die Holzdichte.

Die Bestände werden in die Altersklassen Ak0 bis AkV unterteilt. Altersklassen sind durch unterschiedliche Wachstumsraten gekennzeichnet. Das ist wichtig, weil der jährliche Holzzuwachs junger Bestände den der älteren in der Regel übertrifft.

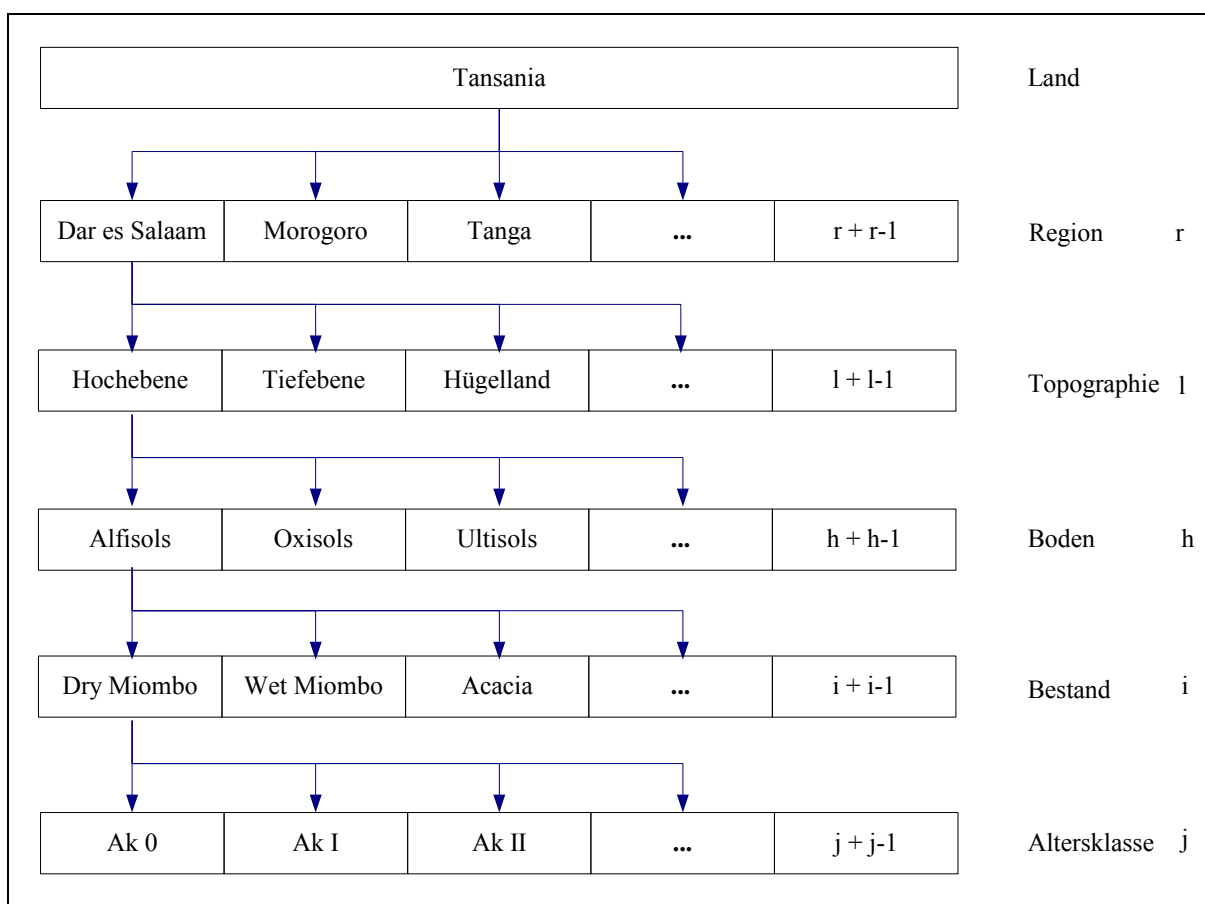


Abbildung 4-4: Hierarchische Ebenen im Waldmodell am Beispiel von Tansania

Die Strukturierung des Waldmodells erfolgt mit Hilfe eines Top-Down-Ansatzes. Die Berechnungsrichtung läuft allerdings in Form eines Bottom-Up-Ansatzes. Die Altersklassen werden detailliert aufgenommen und zu Beständen aggregiert. Alle Bestände werden wiederum in jeder Modellperiode summiert. Durch diese Vorgehensweise ist es möglich, neben der Bestandesentwicklung auch die regionale Waldentwicklung zu erklären.

Im Zuge der Strukturierung wurde geprüft, wie sich der Wald über das RES abbilden lässt. Zunächst wurde versucht, das Waldsystem durch Aggregation einzelner



-Objekte (RES-Objekte) abzubilden. Topographien und die Böden konnten hierarchisch strukturiert werden. Die Bestände und Altersklassen ließen sich jedoch nicht über das RES abbilden, weil sie lediglich den erforderlichen Holzbedarf quantifizieren können. Ein weiteres Problem trat bei der Spezifikation der Gleichungssysteme und bei der Berechnung mit PlaNet auf. Die Berechnungsrichtung im RES läuft zwingend entlang der vorgegebenen Flussrichtungen. Damit mit dem RES Berechnungen durchgeführt werden können, werden die Stoffströme in Gütern aufsummiert. Um die Waldentwicklung zu bestimmen, müssen folgende vier Dimensionen berechnet werden:

- Zuordnung eines bestimmten Bestandes auf veränderlichen Flächengrößen eines Bodens
- Ereignisse, wodurch sich die Bestände auf der Fläche unterschiedlich entwickeln können. Sie können auch in andere Bestände übergehen
- Die zeitliche Bestandesentwicklung
- Die verschiedenen Altersklassen der einzelnen Bestände

Es zeigte sich, dass das Verhältnis von Zeit, räumlicher Auflösung, Ereignissen und Gütern entweder gar nicht, nur mit hohem Aufwand oder sehr stark vereinfacht über die RES-Struktur dargestellt werden kann. Ein Rechenbeispiel soll die erforderliche Anzahl an RES-Objekten bestimmen, wenn folgendes gilt:

- Die zeitliche Bestandesentwicklung erfolgt auf vier unterschiedlichen Bodentypen
- Es gibt vier mögliche Ereignisse
- Es sind vier Bestände mit fünf Altersklassen vorhanden

$$K = \prod_{i=1}^n v_i \quad (4-2)$$

mit:

K	Anzahl der RES-Objekte
n	Anzahl der Faktoren (Bodentypen, Bestände, Altersklassen, Ereignisse)
v	Faktoren
i	Laufindex von v_1 bis v_n

Das Ergebnis sind 320 Kombinationen, die über RES-Objekte abgebildet werden müssten. Es zeigt, dass eine Abbildung über das RES mit einem hohem Zeitaufwand für den Aufbau des RES sowie den Gleichungsspezifikationen verbunden ist. Durch die Einteilung in topographische Ebenen vervielfachen sich zudem die zu erzeugenden RES-Objekte. Das Hauptproblem ist jedoch, dass sich eine dynamische Abbildung der Verhältnisse von Waldsystemen über das RES alleine gar nicht darstellen lässt. Das liegt an den zahlreichen Wechselwirkungen der ein-

zelen Stoffflüsse mit ihren Einflüssen auf das Waldsystem, die nicht über eine starre Zuordnung im RES konstruiert werden können.

In einem weiteren Schritt wurde geprüft, ob sich der Wald über Speichergüter abbilden lässt. Es zeigte sich, dass mit Speichern die Waldentwicklung nicht dargestellt werden kann, da Speicher die Zu- und Abflüsse simulieren und mit ihnen keine komplexen Ressourcenentwicklungen berechnet werden können. Für die Simulation von Waldsystemen müssen sich Veränderungen von Beständen und Speichern in Abhängigkeit ihrer Eigendynamik berechnen und darstellen lassen. Das heißt, dass sich der Bestand in Abhängigkeit von Zuwächsen und Verlusten verändert und dann als Eingangsvariable (Parameter) in die nächste Modellperiode eingeht.

Um die komplexen Zuwachs- und Abflussprozesse eines Waldes simulieren zu können, wurde das RES auf der Basis von zellulären Automaten erweitert. Damit zelluläre Automaten in das RES eingebunden werden können, müssen zwei Bedingungen erfüllt sein:

- sie lassen sich logisch mit der RES-Struktur verbinden
- sie werden durch den bipartiten Graphen beeinflusst, jedoch unabhängig vom bipartiten Graphen berechnet

Eine logische Einbindung von zellulären Automaten in das RES bedeutet, dass Altersklassen als Güter im RES dargestellt werden. Aus den Gütern (Altersklassen) wird der jährliche Verbrauch an Holz mit PlaNet berechnet. Die Entwicklung der Altersklassen unter Berücksichtigung der wesentlichen Einflussfaktoren auf das Wachstum erfolgt jedoch im Gut selbst. Deshalb wird die Entwicklung der Altersklasse unabhängig vom bipartiten Graphen über die zellulären Automaten berechnet und über eine Schleife in die nächste Modellperiode geschrieben. Durch diese Vorgehensweise wird die strenge Regel, dass zwei Güter oder Prozesse im RES nicht direkt über einen Link (Verbindung) miteinander verknüpft werden dürfen, durchbrochen. Nun kann eine ganze Prozesskette über ein einziges Gut mit dem RES verknüpft werden. Das ist für die Berechnung der Waldentwicklung wichtig, weil Ereignisse (Prozesse) wie Waldbrand direkt Prozesse wie die Flächenentwicklung und das Bestandeswachstum beeinflussen.

4.2 Erweiterung des Referenzenergiesystems (RES) mit zellulären Automaten

In diesem Abschnitt wird das RES auf der Basis von zellulären Automaten weiterentwickelt. Zelluläre Automaten, die mit der RES-Struktur verknüpft werden, heißen fortan zelluläre Güter, da sie wie ein Gut in das RES integriert werden. Ein zelluläres Gut ist eine vierdimensionale Matrix zur Berechnung der Entwicklung von rezenten Ressourcen (Wälder). Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden zelluläre Güter neu als dynamisch-komplexe Energiespeicher definiert, weil sich neben den Zu- und Abflüssen vor allem die Entwicklung der Ressourcen bi-

lanzieren lässt. Zelluläre Güter haben die nachfolgenden fünf charakteristischen Eigenschaften:

Geometrie oder Zellraum: Die Gesamtfläche wird mit einem zweidimensionalen Gitter (Zellraum) gleichmäßig überdeckt. Alle Zellen im Gitter sind quadratisch und repräsentieren eine gleich große Fläche (1 km²).

Nachbarschaft: Es gibt eine räumliche Nachbarschaft, wodurch Maßnahmen in einer Zelle die Nachbarzellen beeinflussen. Zum Beispiel kommen bei Kahlschlag die Nachbarzellen in einen höheren Lichtgenuss, wodurch die Photosyntheserate und damit der Zuwachs steigen. Es liegt die Von-Neumann-Nachbarschaft zu Grunde, welche die vier direkt umliegenden Zellen mit einbezieht. Die Linien der Nachbarzellen umschließen die Zelle vollständig. Die Entwicklung der diagonalen Nachbarzellen wird daher nicht beeinflusst. Die zeitliche Nachbarschaft liegt über die einzelnen Modellperioden vor.

Zustandsmenge und -raum: Jede Zelle kann sechs Zustände automatisch annehmen. Das sind die Holzvorräte der sechs Altersklassen Ak_0 bis Ak_V von Beständen sowie ihre Beeinflussung durch Feuer oder sonstige Ereignisse. Der Planer kann in die Prozesse eingreifen und beispielsweise in Ak_0 einen anderen Bestand mit der Zelle verknüpfen. Es gilt:

$$\{(Ak_0_j; f; s) \mid 0 \leq Ak_{j_{wf}} \leq Ak_{j_{wo}}, 0 \leq Ak_{j_{ws}} \leq Ak_{j_{wo}}\},$$

mit:

Wf	Waldbrandgefahr
Ws	sonstige Gefahren für den Wald
Wo	ohne Gefahren
Ak	Altersklassen
f	Feuer
s	sonstige Ereignisse
j	Index der Altersklassen (Ak) von $j = 1, \dots, m$

Tritt ein Ereignis in der Modellperiode t auf, stellt die Zelle den Wert unter Berücksichtigung des Ereignisses in der Modellperiode $t + 1$ dar.

Regeln und Randbedingungen:

- Die Altersklasse Ak_0 repräsentiert die Freiflächen, wenige Bäume bleiben stehen
- Die Altersklassen Ak_I und Ak_{II} entsprechen den Jung- und Durchforstungsbeständen
- Die Altersklassen Ak_{III} und Ak_{IV} zählen zu den Alt- und Endbeständen
- Die Altersklasse Ak_V enthält die Naturwälder

In einer Zelle steht immer der Holzvorrat einer Altersklasse. Für alle Zellen gelten die gleichen

Regeln. Die Altersklassen unterscheiden sich im Holzvorrat [t] pro Fläche und der Wachstumsdynamik. Sie nimmt in der Regel von AkI bis AkV ab.

Spielregeln für zelluläre Güter: Es gibt sechs automatische Zellzustände und vier Nachbarn. Jede Altersklasse geht bei Kahlschlag oder Waldbrand in Ak0 ein und verbleibt dort fünf Jahre. Die Altersklasse eines Bestandes wird in die nächste Altersklasse überführt, wenn sich auf Grund des Alters die Wachstumsdynamik verändert. Eine Altersklasse wird heraufgesetzt, wenn sich der Zustand der jeweiligen Altersklasse $Ak_{Zustand}$ wie folgt definieren lässt und Z dem Zuwachs entspricht:

$$Ak_{Zustand}(t+1) = Ak+1_{Zustand}(t+1) \text{ wenn } Z(t+1) \geq Ak+1_{Zustand}(t+1) \quad (4-3)$$

Die Altersklassen werden in dieser Arbeit 20-jährig eingeteilt. Bei Nichtnutzung wandern die Altersklassen AkI bis AkIV alle 20 Jahre in die nächste Altersklasse, bis sie in AkV angekommen sind. In AkV sind die durchschnittlichen jährlichen Zuwäcche und Verluste gleich groß. In AkV kann per Modelldefinition kein zusätzliches CO₂ gespeichert werden. Die Zellzustände in AkI und AkII können durch Pflege und Durchforstung zusätzlich beeinflusst werden. Die Zellzustände in AkIII und AkIV können durch eine nachhaltige Forstwirtschaft auf einen optimalen Zuwachs getrimmt werden. Das funktioniert jedoch nur bei nicht übernutzten Beständen. Wird beispielsweise eine Zelle komplett abgeholzt (Kahlschlag), bekommen die Nachbarzellen den gleich hohen Anteil am Lichtgenuss und der Sturmwurfgefahr. Alle Altersklassen stehen für eine Nutzung zur Verfügung und können eingeschlagen werden.

4.2.1 Datenaufnahme und -austausch

Die Gesamtfläche wird mit einem Gitter überdeckt. Das Gitter besteht aus n gleich großen Zellen von einem km². Die Zellen werden fortlaufend nummeriert und sind damit eindeutig gekennzeichnet. Jeder Zelle werden nacheinander folgende Daten zugeordnet:

- Topographie (Hoch-, Hügel-, Flachland) *To* mit Index *l*
- Boden *Bo* mit Index *h*
- Bestand *Be* mit Index *i*
- Altersklasse *Ak* mit Index *j*

Jeder Zelle wird zunächst die Topographie und der Boden zugeteilt. In Abbildung 4-5 sind die Topographien mit verschiedenen Grautönen unterlegt. Die Böden sind als Buchstaben eingetragen. Es ist zu sehen, dass beispielsweise Zelle 1 aus Hüggelland und dem Boden des Typs A besteht.

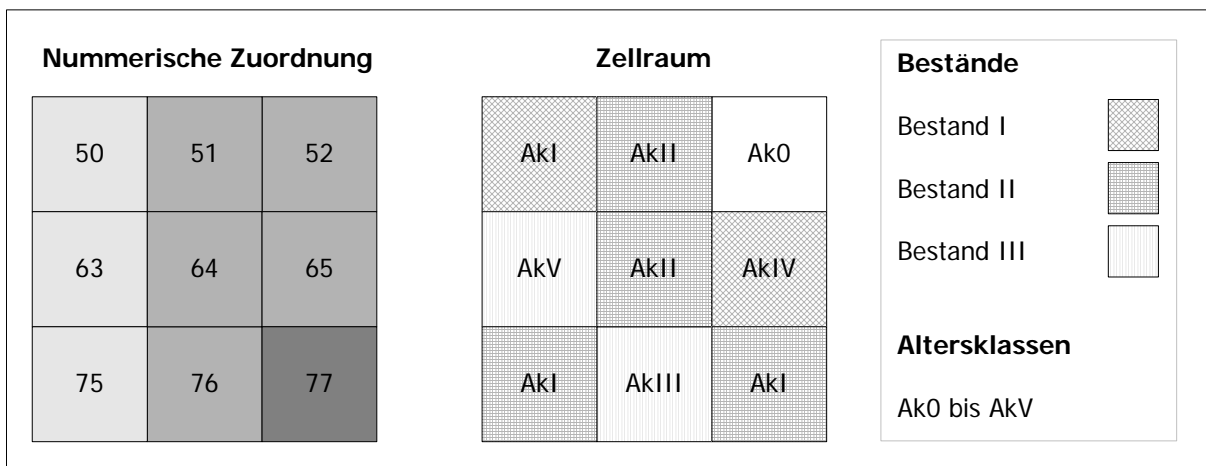


Abbildung 4-6: Bestandes- und Altersklassenzuordnung im Zellraum

Die Bestände sind schraffiert, die Altersklassen mit Ak0 bis AkV gekennzeichnet. Über die numerische Zuordnung werden die Bestände und Altersklassen in jeder Zelle eindeutig festgelegt. Durch die Nummerierung sind die Bestände und Altersklassen auch mit den Topographien und den Böden verknüpft.

In jeder Modellperiode gibt es n Zellen mit gleichen Zuständen. Diese sind charakterisiert durch gleiche To, Bo, Be und Ak. Die Zellen mit gleichen Zuständen werden in jeder Modellperiode summiert. Die Summe der Zellen entspricht der Fläche in km².

Da sich die Anteile der Altersklassen mit der Zeit verschieben, verändert sich der Holzvorrat auf der Waldfläche. Zudem verändert sich der jährliche Holzzuwachs. Der gesamte Holzvorrat einer Region ergibt sich nach Gleichung (4-4).

$$V_{Region} = \sum_{l=1}^q \left(\sum_{h=1}^p \left(\sum_{i=1}^o \left(\sum_{j=0}^m Z_{spec\,l,h,i,j} \cdot A_{l,h,i,j} \right) \right) \right) \quad (4-4)$$

mit:

A	Waldfläche [km ²]
V _{Region}	Holzvorrat der Region [t]
Z _{spec}	spezifischer Holzzuwachs [t/km ²]
l	Index der Topographien (To) von l = 1, ..., q
h	Index der Böden (Bö) von h = 1, ..., p
i	Index der Bestände (Be) von i = 1, ..., o
j	Index der Altersklassen (Ak) von j = 1, ..., m

4.2.3 Flächenbegrenzungen von zellulären Gütern

Das Gesamtsystem beinhaltet räumliche Systemgrenzen. Da der Raum im Gesamtsystem mit einem Gitter überzogen und begrenzt ist, ist sein zugrunde liegender Zellraum gleichermaßen begrenzt. Je kleiner dieser Raum ist, desto stärker wirken sich die Systemgrenzen (Grenzellen)

auf das Verhalten des Systems aus. Diese Effekte gelten nach /Gerhard, Schuster, 1995/ ebenfalls für zelluläre Automaten. Da in den Regeln für das vorliegende Modell die Von-Neumann-Nachbarschaft gilt, haben die Grenzzellen in zellulären Gütern ebenfalls Auswirkungen auf das Verhalten des Waldsystems. Beispielsweise hat Kahlschlag einen Einfluss auf das Wachstum der Nachbarzellen in der folgenden Modellperiode, weil sich der Lichteinfall am Rand der Altersklasse AkIV nach Kahlschlag erhöht. Gleichzeitig kann die Altersklasse AkIV jedoch durch Windwurf stärker gefährdet sein als zuvor, da der Schutz durch die umliegenden Altersklassen fehlt. Das Beispiel in Abbildung 4-7 zeigt die Altersklasse AkIV in der Modellperiode t , die von gleichen Altersklassen umgeben ist. Nach Kahlschlag der Grenzzellen ist die zentrale Altersklasse AkIV in $t + 1$ von Freiflächen Ak0 umgeben.

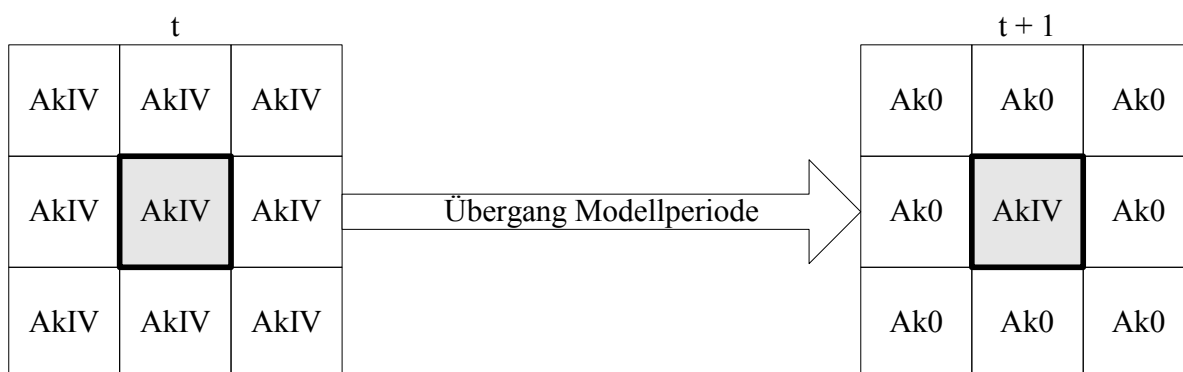


Abbildung 4-7: Zeitliche und räumliche Nachbarschaft

In der Realität wird die Gesamtfläche zudem durch Nachbargrenzen außerhalb des Systems beeinflusst. Die Einflüsse außerhalb der Gesamtfläche werden im Modell nicht berücksichtigt, weil hier die geographische Systemgrenze verläuft. Die Auswirkungen der Grenzzellen um die Gesamtfläche herum können daher nicht berücksichtigt werden.

4.2.4 Verknüpfung von Zellen zu Einheitsflächen

Ausgedehnte Gitter, die Zellen mit vielen Zuständen haben, lassen sich nur schwer überblicken. Zur Datenanalyse ist es daher sinnvoll, Zellen mit gleichen Zuständen in jeder Modellperiode zu summieren. Sie werden in der vorliegenden Arbeit zu Einheitsflächen verknüpft. Eine Einheitsfläche ist durch den gleichen Boden einer Topographie gekennzeichnet. Die Anzahl der Böden auf jeder Topographie entspricht damit der Anzahl der Einheitsflächen im Modell. Jede Einheitsfläche kann unterschiedlich groß sein, weil die Fläche gleicher Böden einer topographischen Ebene unterschiedlich groß sein kann.

Die zusammengefassten Befehle in diesem Modellbereich sind im Flussdiagramm von Abbildung 4-8 zu sehen.

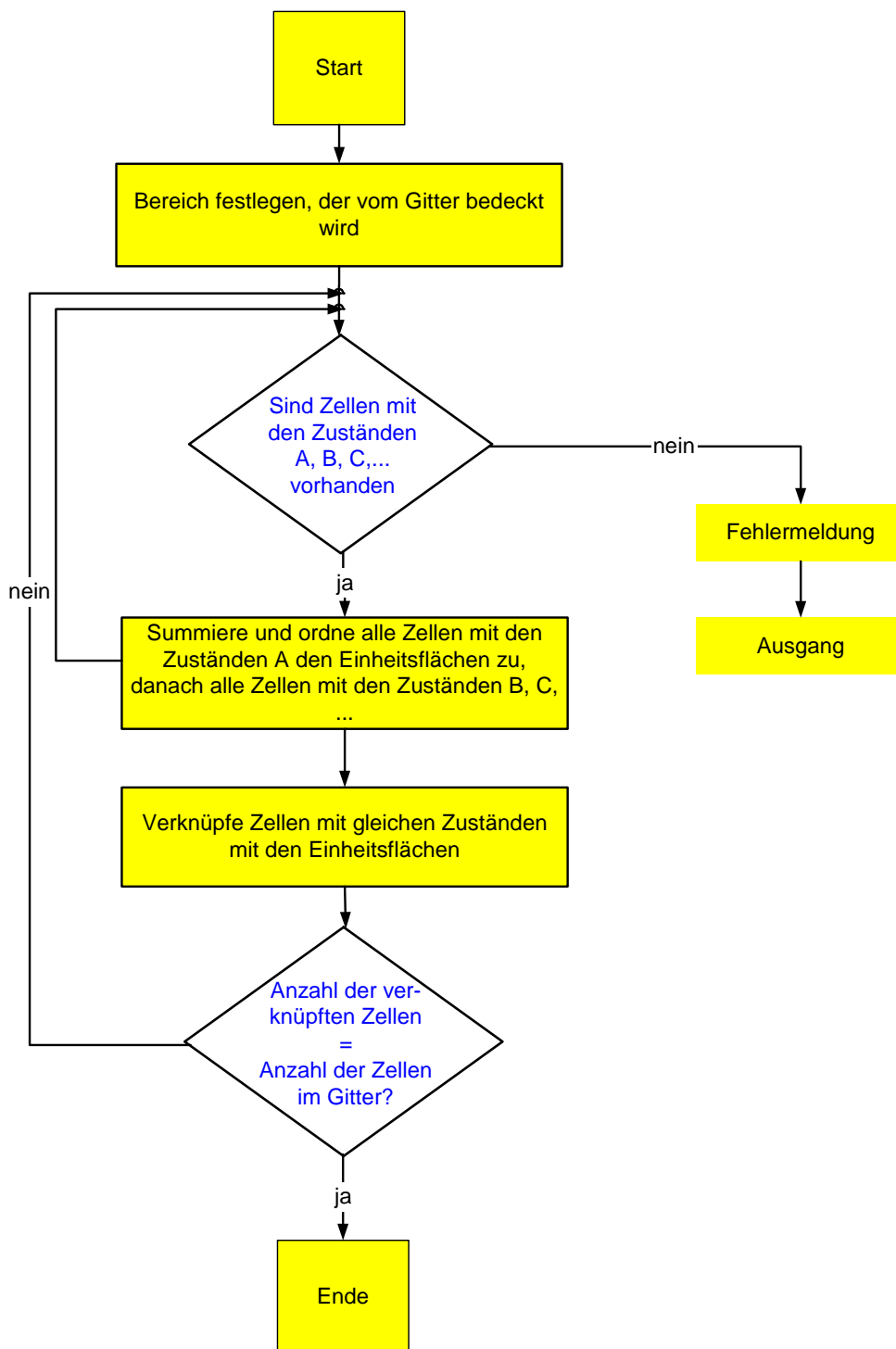


Abbildung 4-8: Verknüpfung von Zellen mit den Einheitsflächen

Durch Addieren gleicher Zellen werden Spaltensummen gebildet. Die Bestände bilden die Spaltensumme k . Die Altersklassen bilden die Reihen i , wie in Abbildung 4-9 an einem Beispiel dargestellt ist. Über diese Vorgehensweise lassen sich die Bestandes- und Altersklassenveränderungen auf einem Boden in jeder Modellperiode direkt ablesen.

Hochebene											
Alfisols											
V_{Ak0} [t]					Altersklasse Ak0						
i i i i											
j	V_{AkI} [t]	V_{AkI} [t]	V_{AkI} [t]	V_{AkI} [t]	Altersklasse AkI						
j	V_{AkII} [t]	V_{AkII} [t]	V_{AkII} [t]	V_{AkII} [t]	Altersklasse AkII						
j	V_{AkIII} [t]	V_{AkIII} [t]	V_{AkIII} [t]	V_{AkIII} [t]	Altersklasse AkIII						
j	V_{AkIV} [t]	V_{AkIV} [t]	V_{AkIV} [t]	V_{AkIV} [t]	Altersklasse AkIV						
j	V_{AkV} [t]	V_{AkV} [t]	V_{AkV} [t]	V_{AkV} [t]	Altersklasse AkV						
Bestand 1 Bestand 2 Bestand 3 Bestand 4											
<table border="1"> <tr> <td>V</td> <td>Holzvorrat der Altersklassen Ak0 bis AkV [t]</td> </tr> <tr> <td>j</td> <td>Laufindex der Altersklassen</td> </tr> <tr> <td>i</td> <td>Laufindex der Bestände</td> </tr> </table>						V	Holzvorrat der Altersklassen Ak0 bis AkV [t]	j	Laufindex der Altersklassen	i	Laufindex der Bestände
V	Holzvorrat der Altersklassen Ak0 bis AkV [t]										
j	Laufindex der Altersklassen										
i	Laufindex der Bestände										

Abbildung 4-9: Summe der Altersklassen auf der Einheitsfläche eines Bodens

Mit dieser Vorgehensweise sieht man auf einen Blick die dominierenden Zustände. Das hat den Vorteil, dass sich erforderliche Maßnahmen (beispielsweise geeignete Baumarten für Aufforstungen) wesentlich übersichtlicher und schneller bestimmen lassen als über die einzelnen Zellen im Gitter. Auf der Einheitsfläche wird in jeder Modellperiode neben dem Holzvorrat die Flächenausdehnung der Bestände und Altersklassen summiert.

4.2.5 Anfangsbedingungen und äußere Einflüsse bei zellulären Gütern

Die Entwicklung eines zellulären Automaten ist zu jedem Anfangszustand eindeutig festgelegt. Die Regeln sind damit am Anfang vollständig deterministisch. Eine Wiederholung zu einem späteren Zeitpunkt unter gleichen Startbedingungen zeigt den exakt gleichen Ablauf. Um die Anfangsbedingungen zu variieren, beziehen viele zelluläre Automaten den Zufall als Start mit ein. Die zellulären Güter hingegen nehmen real zugrunde liegende Werte in jeder Modellperiode an. Die Anfangsbedingungen werden in der ersten Modellperiode vorgegeben. Danach läuft das Modell gemäß seinem zugrunde liegenden Muster weiter. Ändern sich die Zustände in einer Modellperiode, wird das Verhalten an die neuen Verhältnisse angepasst.

Äußere Einflüsse fließen in die zellulären Güter in jeder Modellperiode deterministisch ein. Deterministische Einflüsse sind Wachstum und Nutzung durch den Menschen. Chaotische Einflüsse auf das System sind Naturkatastrophen wie beispielsweise Waldbrand. Sie werden in dieser Arbeit determinisiert und in Kapitel 4.3 mit besprochen.

4.3 Das mathematische Modell NATURE

Das mathematische Modell NATURE ist ein ressourcenorientiertes Simulationsmodul, mit dem eine Kohlenstoffbilanzierung von Wäldern auf verschiedenen Standorten durchgeführt werden kann. NATURE ist geeignet, den Kohlenstoffhaushalt in Waldsystemen auf der Basis von zellulären Gütern zu bilanzieren.

4.3.1 Beschreibung und Vorgehensweise

NATURE hat sowohl deterministische als auch stochastische Bereiche. Berechnungen auf der Basis des RES und der zellulären Güter laufen strikt deterministisch ab. Zufällige Ereignisse, wie beispielsweise Sturmwurf und Feuer, haben einen stochastischen Einfluss auf das Waldsystem und die CO₂-Bilanz. Zufällige Ereignisse finden nicht mit gleicher Eintrittswahrscheinlichkeit statt. Es gibt Gebiete, in denen beispielsweise die Waldbrandgefahr hoch ist und andere Gebiete, die überhaupt nicht gefährdet sind. Die stochastischen Ereignisse werden flächenmäßig mit ihrer jeweiligen Eintrittswahrscheinlichkeit mit den Zellen des Gitters verknüpft und in der Datenbank hinterlegt. Dadurch ergeben sich selbst in den rein stochastischen Gebieten des Modells deterministisch festgelegte Zonen.

Die Eintrittswahrscheinlichkeit für Waldbrand und Erosion wird nach der allgemein bekannten Gleichung (4-5) berechnet

$$w = \frac{h}{n} \quad (4-5)$$

mit:

w

empirische Eintrittswahrscheinlichkeit

h	Häufigkeit des aufgetretenen Ereignisses in der Vergangenheit
n	beobachteter Zeitraum in Jahren

Erosion entsteht in verstärkter Form, wenn die Haltekraft des Bodens verringert wird. Erosion tritt nach Kahlschlag und Waldbrand auf. Sie ist erstens vom stochastischen Ereignis „Waldbrand“ abhängig und zweitens von menschlichen Eingriffen in Form von Kahlschlag. Die bedingte Wahrscheinlichkeit, dass sowohl Erosion und Waldbrand eintreten, ergibt sich aus Gleichung (4-6)

$$w(F \wedge E) = w(F) \cdot w_F(E) \quad (4-6)$$

mit:

w	empirische Eintrittswahrscheinlichkeit
F	Waldbrand
E	Erosion

Da Feuer und Erosion im Modell diskretisiert werden, kann die Binominalverteilung ein geeignetes mathematisches Verfahren sein, um die Wahrscheinlichkeitsverteilung darzustellen und den einzelnen Zellen im Zellraum zuzuordnen. Die Wahrscheinlichkeit eines Waldbrandes kann partiell sehr klein sein, wodurch die Binominalverteilung in eine Poissonverteilung übergeht. Je größer die Waldbrandwahrscheinlichkeit auf einer Fläche ist (1 km²), desto häufiger wird die Altersklasse auf Ak0 zurückgesetzt. Gebiete mit geringer Waldbrandwahrscheinlichkeit ($f_x < 0,05$) werden im Modell als nicht waldbrandgefährdet eingestuft. In diesen Zellen wird kein Waldbrand berücksichtigt, weil es praktisch unwahrscheinlich ist, dass Waldbrand noch einmal oder überhaupt in der Modellierungszeit vorkommt.

4.3.2 Zeitreihenbasierte Referenzbestände in der Datenbank

Referenzbestände sind Bestände, die als Zeitreihen in der MESAP-Datenbank hinterlegt werden. Ein Referenzbestand ist definiert durch einen bestimmten Bestand mit seiner Zuordnung auf einen bestimmten Boden. Das Wachstumsverhalten des Referenzbestandes unter Berücksichtigung verschiedener Ereignisse wird durch verschiedene Zeitreihen dargestellt. Wird beispielsweise im Jahr a durchforstet, wächst der durchforstete Bestand im gleichen Referenzbestand, jedoch auf der Zeitreihe „durchforstet“ im Jahr $a+1$ weiter.

Abbildung 4-10 zeigt das Beispiel eines Referenzbestandes. Es handelt sich um Dry Miombo (typischer ostafrikanischer Bestand) auf Alfisols (Boden). Die jährlichen Zuwachsraten mit und ohne Feuerkontrolle differieren um bis zu 40% /Chidumayo, 1997/, weil in regelmäßig zeitlichen Abständen Brandherde entstehen. Der Referenzbestand ist in die fünf Altersklassen AkI bis AkV unterteilt. Die Einteilung der Altersklassen wird maßgeblich von den unterschiedlichen Wachstumsraten des Bestandes mit dem Alter bestimmt, wie es bereits in den Regeln für

die zellulären Güter beschrieben wurde.

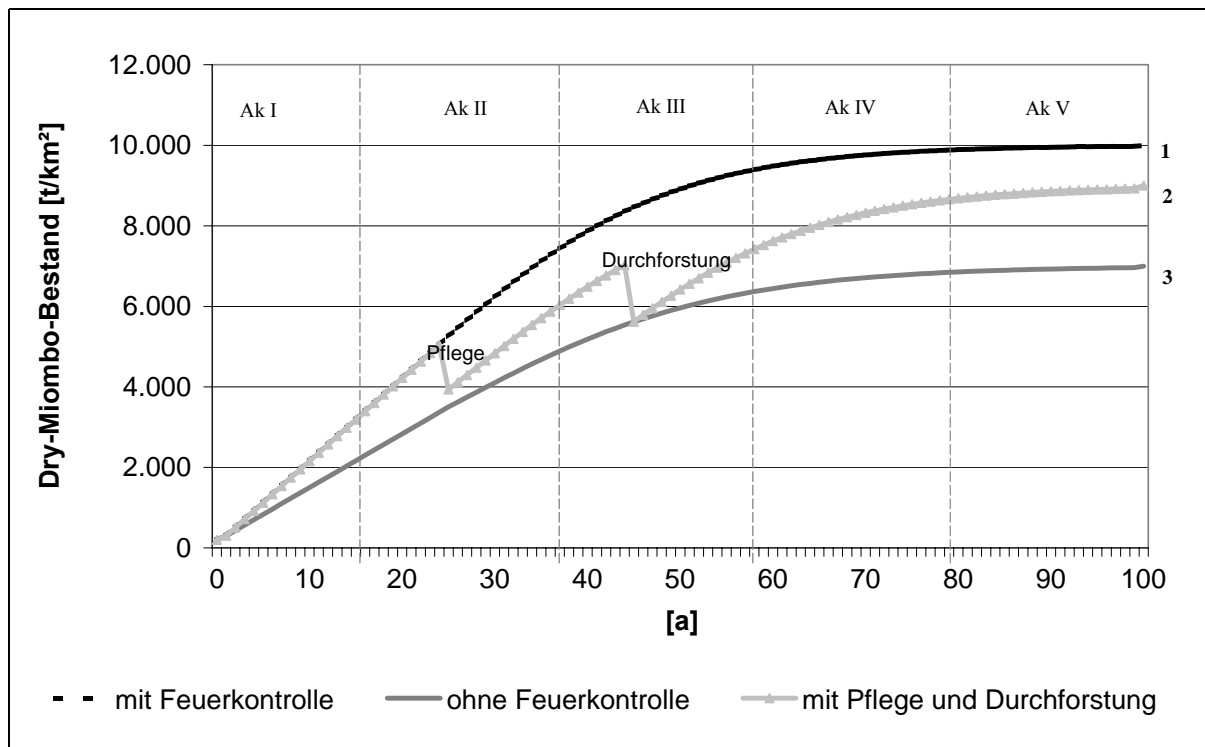


Abbildung 4-10: Holzvorrat eines Referenzbestandes mit unterschiedlichen Wachstumskurven

Die Einteilung der Altersklassen der Referenzbestände erfolgt in 20-jährigen Abstufungen. Damit sind sie mit den Abstufungen der Altersklassen der zellulären Güter kongruent. Es ist zu sehen, dass die Referenzbestände in den ersten 20 Jahren fast linear wachsen und das Wachstum mit zunehmendem Alter abflacht. In der Altersklasse AkIV macht sich das kapazitive Wachstum bemerkbar und nähert sich am Ende der Altersklasse AkIV gegen 0. Daher zählen die noch älteren Bestände (z. B. Naturwälder) zur Altersklasse AkV. Das Jahr 0 repräsentiert das erste Jahr eines sich differenzierenden Bestandes, der sich seit 5 Jahren entwickelt hat. Freiflächen (Ak0) werden in den Referenzbeständen nicht berücksichtigt, da sie wegen der Spielregeln in einen anderen Bestand überführt werden können.

In der Datenbank werden die Referenzbestände hinterlegt, welche im Untersuchungsgebiet vorkommen oder im Rahmen von Maßnahmen neu eingeführt werden. Die 20jährige Einteilung der Altersklassen wird im Modell nicht weiter untergliedert, da die Bäume einer Altersklasse nicht gleich alt sind, sondern auf 1 km² im Bereich der Altersklasse variieren. Es ist daher sinnvoll, den durchschnittlichen Holzvorrat einer Altersklasse pro km² zu bestimmen. Um diesen zu ermitteln, wird für jede Altersklasse das Flächenintegral bestimmt, das links und rechts durch die Altersklassen Ak-1 und Ak+1 begrenzt ist, wie in Gleichung (4-8) dargestellt. Der durchschnittliche Holzvorrat V_{spec} einer Altersklasse auf der Fläche ergibt sich, indem man V durch die Anzahl der Jahre n einer Altersklasse teilt (20 Jahre).

(4-7)

$$V = \int_{a_1}^{a_n} f_1(a) da + \dots + \int_{a_1}^{a_n} f_n(a) da \text{ und } V_{spec} = \frac{V}{n} \quad (4-8)$$

mit:

V	Holzvorrat [t]
V_{spec}	durchschnittlicher Holzvorrat einer Altersklasse pro Flächeneinheit [t/km ²]
$f(a)$	stetige Funktion mit dem Alter
n	Anzahl der Jahre in einer Altersklasse
a	Alter

Jeder Integralabschnitt kann zwischen den Modellperioden in eine andere Kurve $f(a)$ übergehen. Beispielsweise kann vom Referenzbestand 1 in der Modellperiode t in den Referenzbestand 2 in $t+1$ gewechselt werden. Dies richtet sich nach den Maßnahmen (z. B. Durchforstung) und den zufälligen Ereignissen. Tritt ein Ereignis wie Waldbrand F ein, dann verläuft das Wachstum auf Referenzkurve 3. Programmtechnisch liegt hier eine If-Then-Else-Verbindung vor, wie nachfolgend formuliert:

```

If  $F$  in Modellperiode  $t$ 
Then geh zur Wachstumskurve „Waldbrand  $F$ “ in Modellperiode  $t+1$ 
Else anderer Bestand in Modellperiode  $t+1$ 
End

```

Diese Abfrage erfolgt in jeder Modellperiode in den Zellen mit Waldbrandwahrscheinlichkeit.

4.3.3 Diskretes und kapazitives Wachstum zur Abbildung nichtlinearer Trends

Für die Berechnung der Wachstumskurven wird das Vergleichswachstum von gemessenen Beständen auf gleichen Böden zu Grunde gelegt. Liegen ausreichend Wertetupel über den Wachstumszeitraum von Beständen mit Altersklassenverteilungen vor, wird die Regressionsanalyse angewendet, um den Zusammenhang von Alter, Zuwachs und anderen Variablen über die Zeit statistisch zu bestimmen. Bei der Regressionsanalyse bestehen Zusammenhänge zwischen mehreren Merkmalen ($Y, X_i; i = 1 \dots n$). Das heißt, ein Merkmalswert der abhängigen Variablen Y wird von den Werten der unabhängigen Variablen X_i beeinflusst. In Gleichung (4-9) ist die logarithmische Regressionsgleichung als Vorschlag zur Beschreibung vom Waldwachstum formuliert, da die diskrete Wachstumskurve durch eine kapazitive begrenzt wird.

$$Y = a \cdot \ln x + b \quad (4-9)$$

Durch die Regressionsanalyse wird der statistische Zusammenhang von Wertetupeln in einen funktionalen Zusammenhang gebracht. Der funktionale Zusammenhang ist dadurch gekennzeichnet, dass jedem X -Wert genau ein Y -Wert zugordnet ist. Damit ergibt sich eine Funktion

des Alters über die Zeit t . Forsteinrichtungen (periodische Inventur von Wäldern) werden in den meisten Entwicklungsländern nicht durchgeführt, weshalb diese Daten häufig nicht vorhanden beziehungsweise nicht dokumentiert sind. Allerdings gibt es Forschungsprojekte mit dem Ziel, verschiedene Bestände langfristig zu beobachten und die Daten zu dokumentieren. Gleiche Bestände aus unterschiedlichen Dokumentationen können in einen funktionalen Zusammenhang gebracht werden, wenn sie auf gleichen Böden, der gleichen Topographie und der gleichen Klimazone aufgenommen wurden. Auf dieser Basis werden fehlende Messungen bis zur physischen Altersgrenze extrapoliert oder zwischen zwei Werten interpoliert.

Die Kapazitätsgrenze von Beständen ergibt sich aus der Flächenrestriktion und einer physikalisch maximalen Baumhöhe. Ein Bestand kann auf einer Fläche von 1 km² nicht beliebig viel Biomasse und damit Kohlenstoff ansammeln. Er stößt an seine Kapazitätsgrenze.

Durch Abschätzung der Kapazitätsgrenze und Vergleich des Modellkurvenverlaufs mit der Wachstumskonstante in der Realität kann das Wachstum in die Zukunft projiziert werden. Die vorliegenden Berechnungen basieren auf einer Kombination von diskretem und kapazitivem Wachstum. Das hängt damit zusammen, dass Jung- und Durchforstungsbestände (AkI und AkII) in der Regel durch größeres Volumenwachstum gekennzeichnet sind. Die Wachstumsraten nehmen mit dem Alter ab und nähern sich gegen Null. Die Kulmination von Volumenzuwächsen ist jedoch für die Bestände sehr unterschiedlich und muss für jeden Referenzbestand einer Höhenlage und eines Bodens gespeichert werden. In Gleichung (4-10) ist die allgemein bekannte Formel zur Berechnung des diskreten Wachstums formuliert.

$$W_{disk} = N_A \cdot (1 + p)^i \quad (4-10)$$

mit:

W_{disk}	diskretes Wachstum
N_A	Anfangsmenge
p	Prozentsatz
i	Anzahl der Zeiträume

Gleichung (4-11) zeigt die allgemeine Formel zur Berechnung des kapazitiven Wachstums.

$$W_{kap} = \frac{N_A \cdot N_E}{(N_A - ((N_A - N_E) \cdot e^{-w \cdot t}))} \quad (4-11)$$

mit:

W_{kap}	kapazitives Wachstum
N_A	Anfangsmenge
N_E	Endmenge
w	Wachstumskonstante
t	Zeit

Die Wachstumsvorgänge der Referenzbestände setzen sich aus diskretem Wachstum in den ersten Altersklassen und kapazitivem Wachstum in den Alt- und Endbeständen zusammen.

4.3.4 Dynamisierung der Kohlenstoffbilanzierung in Böden

Der Kohlenstoffvorrat im Boden ist abhängig vom jeweiligen Bestand, der Nutzungsart, der Erosion, dem Klima und der Zeit. Zudem wird der Boden durch absterbende Biomasse und Verbrennung beeinflusst. Diese Zerfallsprozesse beeinflussen wesentlich den Humusgehalt im Oberboden. Die Umsetzungsvorgänge zu Humus spielen damit eine Schlüsselrolle im Kohlenstoffhaushalt der Böden. Er entsteht aus der Verrottung organischer Substanz und kann Kohlenstoff binden. Da der Humus durch chemische, physikalische und mikrobiologische Prozesse umgewandelt wird, kann er jedoch auch CO₂ freisetzen.

Über die Umsatzzeit kann die zeitliche Veränderung des Humusgehaltes im Boden bestimmt werden. Die Umsatzzeit U ergibt sich aus dem Quotienten des Humusgehalts h und der jährlichen Zufuhr an organischer Substanz h_{zu} .

$$U(t) = \frac{h \cdot (t + 1)}{h_{zu}(t)} \quad (4-12)$$

mit

U	Umsatzzeit von organischer Substanz
h	Humusgehalt
h_{zu}	jährliche Zufuhr an organischer Substanz

Über diese Formel lässt sich die Zeit ermitteln, bis die organische Substanz in Humus übergeht. Der gesamte Humus errechnet sich aus der jährlichen Zufuhr an organischer Substanz h_{zu} multipliziert mit der Umsatzzeit U .

Veränderungen im oberirdischen Bestand über die Zeit führen zu steigender oder sinkender Zufuhr an organischer Substanz in den Boden. Daher beeinflusst die Bestandesentwicklung die Zufuhr an organischer Substanz im Boden. Dies wird über die Kopplung von Referenzbestand und Böden im Modell berücksichtigt. Den Böden fließt in jeder Modellperiode die abgestorbene Biomasse zu. Hierzu zählt die Trockenmasse aus Blättern und abgestorbenen Pflanzen- und Baumteilen. Außerdem werden Ernteverluste über den durchschnittlichen Faktor von einem Prozent des geernteten Holzes berücksichtigt. Dieses Restholz verrottet und geht im Modell ebenfalls in Humus über.

Über die Paulsen'sche Formel lassen sich für jede Modellperiode neue Werte für einen Boden berechnen. Der Zu- und Abgang von Bodenkohlenstoff über die Zeit wird zudem durch die Bestandesveränderung und von der Nutzungsart direkt beeinflusst.

Die Summe der Kohlenstoffdifferenz in der Modellierungszeit t und die Dynamisierung der Paulsen'schen Formel lautet:

$$VBoden = \sum_{h=1}^p (Vorganisch_h + VZufluss_h - VAbfluss_h) \cdot A_h \quad (4-13)$$

mit:

V_{Boden}	Kohlenstoffvorrat im Boden in einer Modellperiode [t]
$V_{organisch}$	Anteil der organischen Substanz im Boden [t/km ²]
$V_{Zufluss}$	organischer Nettozufluss durch die Altersklassen [t/km ²]
$V_{Abfluss}$	organischer Nettoabfluss und Humusschwund [t/km ²]
A	Fläche [km ²]
h	Index der Böden (Bö) von $h = 1, \dots, p$

4.3.5 Automatisierung von zellulären Gütern

Zu Beginn der Modellierungszeit wird jeder Altersklasse eines Bodens ihre Gesamtfläche zugeordnet. Die Fläche soll sich in Abhängigkeit von Holzzuwachs und -abgang automatisch verändern lassen. Die Flächenentwicklung hängt direkt von der Altersklassenentwicklung ab, weil sich die Altersklassen mit der Zeit gegenseitig verschieben.

Bei einer Altersklasseneinteilung von 20 Jahren und jährlichen Modellperioden gehen in der Modellperiode $t + 1$ aufgrund der veränderten Zuwachsdynamik 5% der Altersklasse $A_{k_{j=1}}$ in die Altersklasse $A_{k_{j=2}}$ ein, während 95% in der Altersklasse $A_{k_{j=1}}$ verbleiben. Das bedeutet, dass nach 20 Modellperioden die gesamte Altersklasse $A_{k_{j=1}}$ in $A_{k_{j=2}}$ übergeht. Da sich durch Nutzungen sowohl die Flächenanteile als auch die Zuwachsdynamiken verändern, können diese Verhältnisse alleine nicht als realitätsnah bezeichnet werden. Sie reichen zur vereinfachten Abbildung von Wäldern für eine CO₂-Bilanzierung nicht aus. Es muss also eine Möglichkeit gefunden werden, wie sich Altersklassenveränderungen mit ihrer Auswirkung auf die Flächenanteile realistischer automatisieren lassen.

Die Nutzungen auf der Fläche müssen unbedingt mit einbezogen werden, um die Flächenanteile der Altersklassen zu bestimmen. Die Altersklassen verschieben sich in der Realität nicht nur nach statistischen Grundsätzen, sondern auch in Abhängigkeit von der Nutzung. Das Vorgehen bei der Automatisierung von zellulären Gütern läuft folgendermaßen ab: Der Bedarf an Holzprodukten wird von den zellulären Gütern beginnend mit der ersten Modellperiode eingelesen. Dieser Bedarf wird vom Vorrat der jeweiligen Altersklasse am Ende der Modellperiode abgezogen und fließt über die vorgegebene Flussrichtung im RES ab. Nachdem die Fläche für jede Altersklasse am Anfang der ersten Modellperiode aufgenommen wurde, berechnen die zellulären Güter die Flächenanteile und Altersklassenveränderungen automatisch für die gesamte Modellierungszeit über die dynamisch sequenzielle Zeitreihenanalyse, wie sie in Kapitel 4.4.4 beschrieben wird.

Durch die Automatisierung von zellulären Gütern im RES können Nutzungen und zufällige Abgänge quantifiziert werden. Die Automatisierung wird nachfolgend mathematisch be-

schrieben. Für die Gleichungen gelten die folgenden Abkürzungen:

<i>A</i>	Fläche [km ²]
<i>B</i>	spezifischer Holzvorrat am Ende der Modellperiode [t/km ²]
<i>C</i>	spezifischer Holzvorrat am Anfang der Modellperiode [t/km ²]
<i>D</i>	Altersklasse mit Zuwachs [t]
<i>E</i>	Holzvorrat am Ende der Modellperiode [t]
<i>F</i>	Flächeneinheit [km ²]
<i>G</i>	Fläche am Anfang der Modellperiode [km ²]
<i>H</i>	Holzvorrat am Anfang der Modellperiode [t]
<i>V</i>	Holzvorrat im Gitter [t]
<i>V_{genutzt}</i>	genutzter Holzvorrat [t]
<i>Z_{spec}</i>	spezifischer Holzzuwachs [t/km ²]
<i>Z</i>	jährlicher Holzzuwachs aller Altersklassen [t]
<i>c</i>	Konstante der Altersklassenübergänge
<i>k</i>	Marktanteile der Altersklassen [%]
<i>t</i>	Zeit $t = n$ [a]

Indices:

<i>h</i>	Index der Böden (Bö) von $h = 1, \dots, p$
<i>i</i>	Index der Bestände (Be) von $i = 1, \dots, o$
<i>j</i>	Index der Altersklassen (Ak) von $j = 1, \dots, m$

Der Holzvorrat der Altersklasse [t] ergibt sich aus der zur Verfügung stehenden Fläche [km²] multipliziert mit dem spezifischen Holzvorrat der Altersklassen [t/km²] am Anfang der Modellperiode, wie in Gleichung (4-14) dargestellt ist.

$$V_{h,i,j}(t=n) = A_{h,i,j}(t=n) \cdot C_{h,i,j} \quad (4-14)$$

Der gesamte jährliche Zuwachs aller Altersklassen ergibt sich aus der Summe der Fläche über alle Altersklassen multipliziert mit dem spezifischen Zuwachs aller Altersklassen.

$$Z = \sum_{j=0}^m A_{h,i,j} \cdot Z_{spec,h,i,j} \quad (4-15)$$

Der Holzvorrat der Altersklassen mit Zuwachs setzt sich zusammen aus der Summe des Holzvorrates der Altersklassen der vorhergehenden Modellperiode plus dem Zuwachs der Altersklassen in der aktuellen Modellperiode.

$$D_{h,i,j}(t=n) = \sum_j V_{h,i,j}(t=n-1) + Z_{h,i,j}(t=n) \quad (4-16)$$

Der genutzte Holzvorrat über alle Altersklassen resultiert aus der Summe der Altersklassen am Anfang der Modellperiode multipliziert mit den Anteilen zur Deckung des Holzbedarfs im Energiemodell.

$$V_{genutzt\ h,i,j} = \sum_{j=0}^{m-1} k_{h,i,j} \cdot H_{h,i,j} \quad \text{Bedingung: } H_{h,i,j} \geq 0 \quad \forall j \quad (4-17)$$

Der Holzvorrat der Altersklassen am Ende der Modellperiode ergibt sich aus den Altersklassen mit Zuwachs abzüglich dem genutzten Holz der Altersklassen.

$$E_{h,i,j} = D_{h,i,j} - V_{genutzt\ h,i,j} \quad (4-18)$$

Die Fläche, die in der nächsten Modellperiode in Ak0 wandert, ergibt sich aus dem Quotienten an genutztem Holz und dem spezifischen Holzvorrat am Ende der Modellperiode.

$$A_{j=0}(t=n+1) = \frac{V_{genutzt\ h,i,j}}{B_{h,i,j}} \quad (4-19)$$

Der Holzvorrat, der in der nächsten Modellperiode in der Altersklasse Ak0 steht, ergibt sich nach Gleichung (4-20).

$$V_{j=0}(t=n+1) = A_{j=0}(t=n+1) \cdot C_{j=0,h,i} \quad (4-20)$$

Die Fläche, die in der folgenden Modellperiode in der gleichen Altersklasse bleibt, wird nach Gleichung (4-21) berechnet.

$$A_{h,i,j} = A_{h,i,j}(t=n) \cdot c - A_{j=0,h,i}(t=n+1) \quad (4-21)$$

Der Holzvorrat jeder Altersklasse, der in der folgenden Modellperiode in der gleichen Altersklasse bleibt, wird nach Gleichung (4-22) berechnet.

$$V_{h,i,j} = E_{h,i,j}(t=n) \cdot c - E_{h,i,j=0}(t=n+1) \quad (4-22)$$

Die Fläche, die in der folgenden Modellperiode in die nächste Altersklasse übergeht, ergibt sich nach Gleichung (4-23). Sie errechnet sich aus der Fläche am Anfang der Modellperiode abzüglich der Flächen, die am Ende der Modellperiode in $j=0$ beziehungsweise in der gleichen Altersklasse bleiben.

$$A_{h,i,j+1} = A_{h,i,j} - A_{h,i,j=0} - A_{h,i,j=j} \quad (4-23)$$

Der Holzvorrat, der in der folgenden Modellperiode in die nächste Altersklasse steigt, ergibt sich nach Gleichung (4-24). Er errechnet sich aus dem Holzvorrat am Anfang der Modellperiode abzüglich des Holzvorrates, der am Ende der Modellperiode in $j=0$ übergeht beziehungsweise

weise in der gleichen Altersklasse bleibt.

$$V_{j+1, h, i} = H_{j, h, i} - E_{j=0, h, i} - E_{j=j, h, i} \quad (4-24)$$

Aus diesen Berechnungen ergibt sich der Holzvorrat jeder Alterklasse pro Flächeneinheit (km²) am Ende jeder Modellperiode.

$$B_{h, i, j} = \frac{V_{h, i, j}}{F_{h, i, j}} \quad (4-25)$$

4.4 Schnittstellen zwischen PlaNet und NATURE

4.4.1 Modellstruktur und mathematische Modelle

Das Gesamtmodell besteht in Anlehnung an /Schlenzig, 1998/ aus den drei Ebenen mit dem mathematischen Modell, dem Realmodell und der Datenbank, wie in Abbildung 4-11 zu sehen ist.

Für die Abbildung des Gesamtsystems wird also eine logische Dreiteilung der Modellierungsebenen vorgenommen, um die Modellstruktur (Realmodell), den Datenbereich und die mathematischen Modelle methodisch gegeneinander abzugrenzen. Das Waldmodell wird, wie bereits besprochen, über das Realmodell der zellulären Güter mit NATURE berechnet. Das Energiemodell wird über das RES mit PlaNet berechnet. Hieraus ergibt sich die Berechnung des Gesamtmodells. Beide mathematischen Modelle sind mit ihrer eigenen RES-Struktur verknüpft, die in Abbildung 4-11 als vertikale „Stränge“ dargestellt sind.

Stränge werden in dieser Arbeit als Verbindungen von Real- und mathematischen Modellen definiert. Sie dienen zur eindeutigen Verbindung der Real- mit den zugehörigen mathematischen Modellen. Die Daten mit Zeitreihen sind in der Datenbank von MESAP hinterlegt.

Die Realitätsabbildung von RES und zellulären Gütern ist über Schnittstellen logisch verbunden. Die Schnittstellen verbinden die beiden getrennten Teilstrukturen des RES zu einem gesamten RES. Die Schnittstellen zu den zellulären Gütern bestehen aus dem Holzbedarf und der Zuteilung an die Verbraucher.

Die Verbindung von Modellstrukturen, Datenbereich und mathematischen Modellen erfolgt über diese Schnittstellen. Sowohl die Ebenen als auch die Stränge sind miteinander verknüpft. Zum einen sind die zellulären Güter vom Waldsystem und das RES des Energiesystems über die RES-Schnittstellen verbunden. Zum anderen sind die Daten der Datenbank und die Gleichungsspezifikationen der mathematischen Modelle über diese Schnittstellen verknüpft. PlaNet berechnet die Energie- und Kohlenstoffbilanz über den bipartiten Graphen im RES und aggregiert die Bilanzierung auf das Gesamtsystem. NATURE bilanziert in diesem Bereich des Modells die Holzzuflüsse und -abflüsse in den zellulären Gütern. NATURE und PlaNet ver-

walten die jeweiligen Gleichungsspezifikationen.

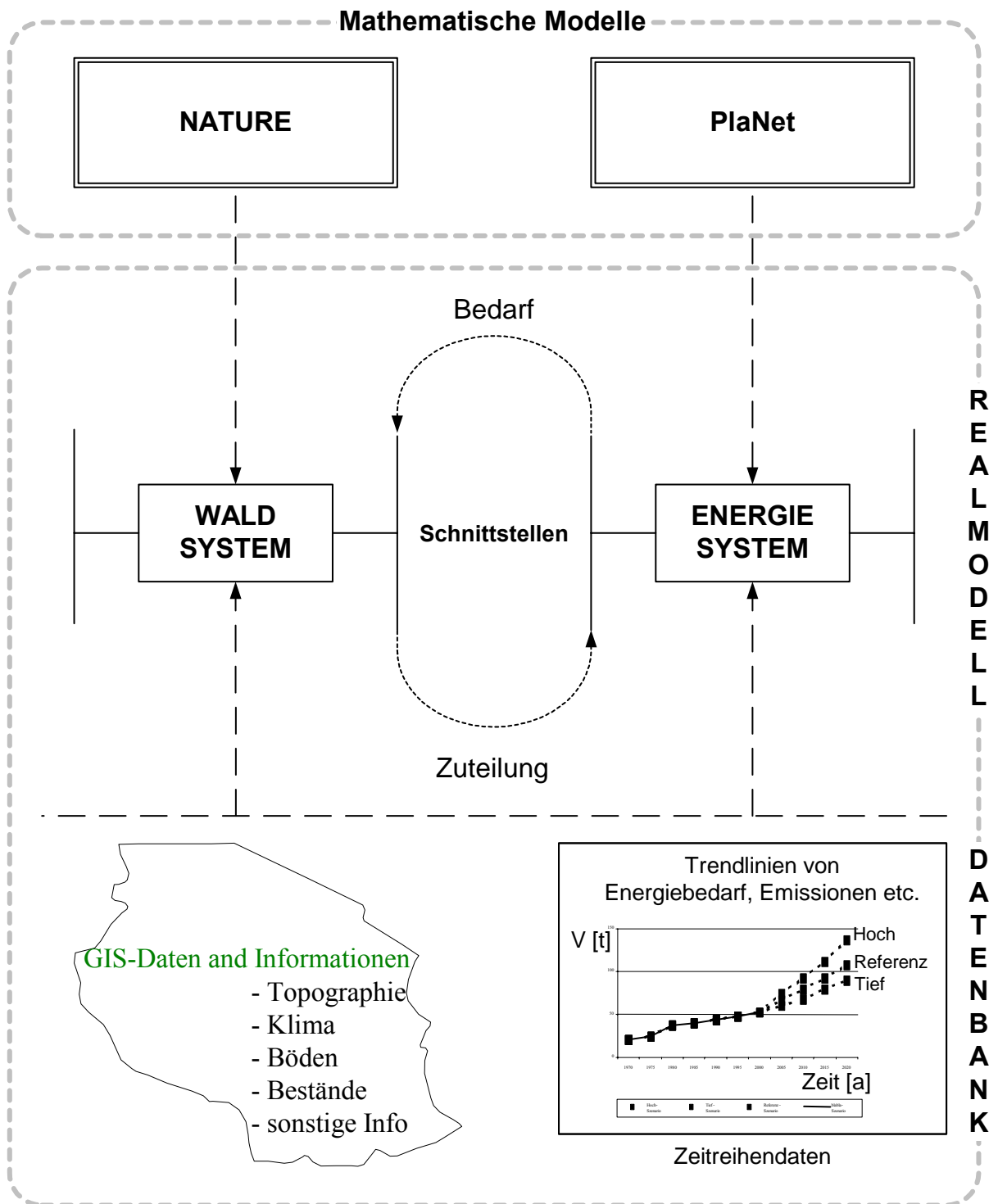


Abbildung 4-11: Modellstruktur, Realmodelle und mathematische Modelle

4.4.2 Energiespeicher

Energiespeicher (Holzspeicher) sind in dieser Arbeit Bestandteil der zellulären Güter. Einen Energiespeicher definiert /Tamme, 2002/ als Medium, dessen energetischer Zustand durch Energieaufnahme erhöht und durch Energieabgabe erniedrigt wird. Das Medium wird bei diesem Zustandswechsel nicht verbraucht. Wälder gehören zu den rezenten Energiespeichern. In Wäldern wird Energie in Form von Holz gespeichert. Auf Grund der Speicherhaltung kann das Holz eingeschlagen werden, wenn es gebraucht wird.

Die neu entwickelten zellulären Güter sind komplexe Energiespeicher, weil sich neben den Zu- und Abflüssen vor allem die Entwicklung der Ressourcen (Wälder) bilanzieren lässt.

In den zellulären Gütern wird der jährliche Holzzuwachs berechnet und mit dem jährlichen Holzverbrauch verglichen. Falls der *Zufluss* < *Abfluss* in der Modellierungszeit, ist keine nachhaltige Forstwirtschaft gegeben, weil die Waldressourcen übernutzt werden. Um Übernutzungen zu vermeiden kann der Energiespeicher im Modell so definiert werden, dass der maximale Abfluss den Zufluss nicht übersteigen darf. Es gilt: $Abfluss_{maximal} = Zufluss$. Unter dieser Bedingung können fossile Energieträger durch Holz nachhaltig ersetzt werden.

Falls ein uneingeschränkter Holzverbrauch zugelassen wird, stellt sich die Frage, ob sich die Kohlenstoffbilanz im Gesamtsystem negativer entwickelt als durch Nutzung fossiler Energieträger. Die Abflusssteuerung über den Energiespeicher kann ein wesentliches Element sein, um den Kohlenstoffhaushalt eines Energiesystems zu manipulieren. Der Energiespeicher kann nie negativ werden. Er kann im Modell theoretisch auf 17,4 GJ/km² beziehungsweise 1 t/km² absinken. Über die zellulären Güter können dem Gesamtmodell auch Restriktionen hinsichtlich der Art des Einschlags (Kahlschlag, Durchforstung...) vorgegeben werden.

4.4.3 Katastrophen

In dieser Arbeit werden unter dem Begriff Katastrophen Waldbrände und Stürme verstanden, die das Waldsystem beeinträchtigen können. Sie werden anhand der Wahrscheinlichkeitsberechnung aus Gleichung (4-5) und aus Gleichung (4-6) berechnet. Während das Sturmholz energetisch verwendet werden kann, reduzieren Waldbrände die nutzbaren Holzressourcen. Waldbrände sind damit Vorgänge, welche die Holznutzung einschränken. In Folge von Katastrophen kommt es häufig zu verstärkter Erosion des Oberbodens. Erosion beeinträchtigt wiederum das zukünftige Bestandeswachstum.

Im Rahmen von Strategien kann im Waldmodell eine maximale Grenze der jährlichen Nutzung gesetzt werden. Je mehr Wald verbrennt, desto geringer wird die nutzbare Holzressource in der Modellperiode. Um den Energiebedarf zu decken, wird im Energiemodell der Marktanteil eines anderen Gutes erhöht. Dieses Gut (beispielsweise Gas) wird als sogenannter Residual angelegt, dessen Marktanteil steigt, wenn weniger Waldholz zur Verfügung steht.

In Abhängigkeit von der Flächengröße einer Altersklasse und ihrer Gefährdung durch Feuer und Erosion kommt es zu unterschiedlichen Auswirkungen auf das Wachstum in der

nächsten Modellperiode. In Abbildung 4-12 ist das Gesamtsystem mit seinen Schnittstellen und Systemübergängen dargestellt.

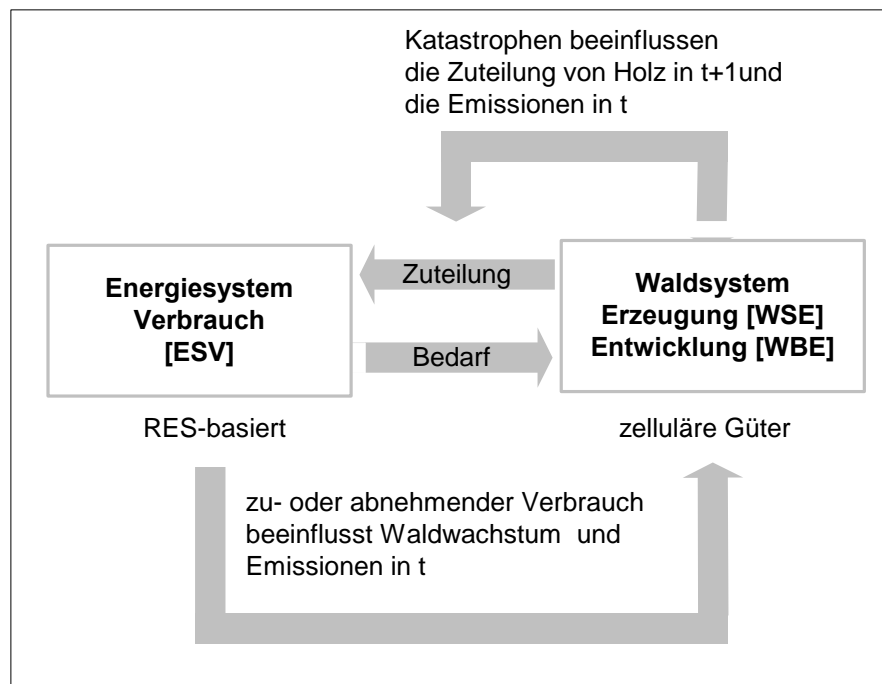


Abbildung 4-12: Schnittstellen und Systemübergänge im Gesamtsystem

Wie in Kapitel 4.1 beschrieben, besteht das Gesamtsystem in der vorliegenden Arbeit aus dem Energie- und dem Waldsystem, die über den Holzaustausch miteinander verbunden sind. Zusammen mit dem Energiesystem übt der Holzverbrauch im Waldsystem einen Einfluss auf die Entwicklung des Waldbodensystems mit seinen Emissionen aus. Das Energiesystem und die Bereitstellung sind RES-basiert und werden mit PlaNet berechnet. Das Waldsystem Erzeugung wird über zelluläre Güter dargestellt und mit NATURE berechnet. Die Entwicklung des Waldbodensystems ergibt sich aus der Berechnung von PlaNet und NATURE aufgrund der gesamten Berechnungsschritte.

4.4.4 Evolutionäres Lösen durch dynamisch-sequenzielle Zeitreihenanalyse

Für die RES-basierte Modellierung des Gesamtsystems musste auf Grund der Wechselwirkungen von Energie- und Waldsystem ein Verfahren gefunden werden, das es erlaubt, Zeitreihen dynamisch während eines Berechnungsprozesses zu aktualisieren und die Ergebnisse über eine Schleife wieder zurück in die nächste Modellperiode als Eingangsvariablen zu schreiben. Dazu werden die Zeitreihen eines Modells in einzelne Modellperioden zerlegt. Sie bilden letztendlich wieder die gesamte Modellierungszeit.

Die Lösung der Gleichungssysteme erfolgt über drei Stufen. Zunächst werden die Gleichungssysteme von zellulären Gütern und dem RES erstellt. Danach wird das Gleichungssystem der zellulären Güter mit NATURE gelöst. Anschließend wird das gesamte RES mit PlaNet

berechnet. Die Anzahl der Berechnungen richtet sich nach der Anzahl der Modellperioden, da die Variablen die Parameter der folgenden Modellperiode mit bestimmen.

Der prinzipielle Vorgang des evolutionären Lösens über die Modellierungszeit ist in Abbildung 4-13 dargestellt.

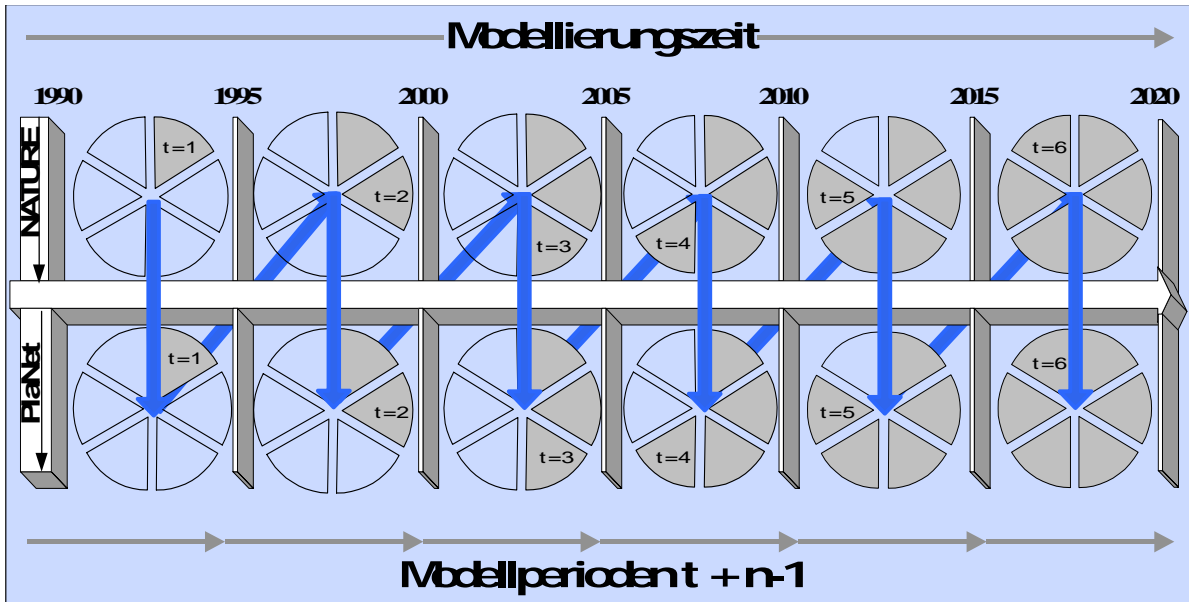


Abbildung 4-13: Evolutionäres Lösen mit NATURE und PlaNet

Der Zustand der Eingangsvariablen in der Modellierungsperiode t von WSE berechnet sich aus den Variablen der letzten Modellperiode t von ESV. Der Zustand der Eingangsvariablen in der Modellperiode t von ESV berechnet sich wiederum aus den Variablen der letzten Modellperiode t von WSE.

Die Variablen der dynamischen Kreislaufberechnungen aus Periode t bilden die Eingangsvariablen von Periode $t + 1$. Das heißt, dass die Ergebniszeitreihen der Vorgängermodellperiode die Eingangsvariablen für die nachfolgende Modellperiode sind.

In Tabelle 4-1 stehen berechnete Werte exemplarisch für evolutionäres Lösen und Einmal-Lösen. Die Ergebnisse zeigen, dass der Unterschied beider Lösungswege zunehmend größer wird. Bei Modellierungszeiten von 15 Jahren ist der Unterschied mit gut einem Prozent relativ gering. Allerdings steigt der Unterschied bei 30-jähriger Modellierungszeit auf über 5% an und dürfte sich bei noch längerer Modellierungszeit erheblich vergrößern.

Der Vergleich in Tabelle 4-1 zeigt, dass für kürzere Modellierungszeiten von 10 bis 15 Jahren auf das evolutionäre Rechnen verzichtet werden kann, weil die Unsicherheit der Datenlage in Entwicklungsländern ohnehin hoch ist. Da sich der Fehler jedoch mit der Zeit fortsetzt, ergeben sich für lange Modellierungszeiten deutliche Unterschiede, über die nicht hinweggegangen werden kann. Hierin ist auch der entscheidende Unterschied zu sehen, wenn beide Systeme getrennt voneinander bilanziert und nach der Modellierung summiert werden. Hier gilt, dass gerade mit höherer Sicherheit der Datenlage möglichst viele Ungenauigkeiten im Model-

lierungsverfahren vermieden werden sollten. Das evolutionäre Lösen bietet sich überall dort als Lösungsverfahren an, wo die Datenlage zuverlässig ist und lange Zeiträume analysiert werden sollen.

Tabelle 4-1: Unterschied zwischen evolutionärem Lösen und Einmal-Lösen

Emissionen [Mt CO ₂ eq]	Modellperiode						
	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020
<i>Einmal-Lösen</i>	2,76	3,63	5,01	5,08	4,91	4,76	4,66
<i>evolutionäres Lösen</i>	2,76	3,66	5,07	5,17	5,05	4,96	4,92
<i>Differenz [%]</i>	-	0,68	1,15	1,82	2,70	3,92	5,38

Der große Nachteil des evolutionären Lösens liegt in der praktischen Umsetzung. Die Rechenzeiten sind bei jährlicher Zeitauflösung und 30-jähriger Modellierungszeit um den Faktor 30 höher. Das liegt daran, dass jeder Rechenlauf mit PlaNet und NATURE beim ersten Modelljahr startet und beim letzten Modelljahr endet. Bei einer Rechenzeit von 10 Minuten beim Einmal-Lösen bedeutet das eine Rechenzeit von 5 Stunden mit evolutionärem Lösen. Der Zeitaufwand für das Modellieren steigt daher immens an. Durch die weiter rasant ansteigenden Rechnergeschwindigkeiten sind allerdings für das evolutionäre Lösen akzeptable Rechenzeiten zu erwarten. Die Entwicklung eines gemeinsamen „Solvers“, der beide Systeme ohne manuelles Eingreifen berechnen kann, sollte ebenfalls erwogen werden.

4.5 Energie- und Kohlenstoffbilanzierung in den Modellen

In den Modellen wurden die drei Treibhausgase CO₂, CH₄ und N₂O aus Tabelle 4-2 als CO₂-Äquivalente bilanziert, die in Kurzform als „CO₂eq“ bezeichnet werden.

Tabelle 4-2: Erwärmungspotentiale und berücksichtigte Prozesse im Modell

Treibhausgas	Formel	Erwärmungspotenzial*	berücksichtigte Prozesse
Kohlendioxid	CO ₂	1	<ul style="list-style-type: none"> - Verbrennung fossiler und rezenter Energieträger - Waldbrände und Brandrodung - Transport und Verteilung - industrielle Prozesse - biotische Prozesse in Böden
Distickstoffoxid	N ₂ O	310	
Methan	CH ₄	21	

verändert nach /Öko Institut, 2003/, /Becher, 1998/, /IPCC, 1997/ und /Goldammer, 1993/
 * GWP (Global Warming Potential) bezogen auf 100 Jahre

Waldmodell

Der Wald speichert Energie in Form von organisch gebundenem Kohlenstoff. Er ist deshalb sowohl ein Energie- als auch ein Kohlenstoffspeicher (bzw. CO₂eq-Speicher). Energie- und Kohlenstoffspeicher werden hier kurz als W_{Sp} bezeichnet. Ausgang für die Berechnung der Veränderung von W_{Sp} in der Modellierungszeit ist W_{Sp} im Basisjahr 1990. Die Veränderung von W_{Sp} wurde als Differenz aus dem Energie- beziehungsweise Kohlenstoffzuwachs und dem Energie- beziehungsweise Kohlenstoffverlust durch Waldbrände, Humusschwund sowie Holzernte und Transport ins Energiesystem berechnet. In Anlehnung an /Voß, 1999/ wurde folgende Bilanzgleichung für die Veränderung von W_{Sp} aufgestellt.

$$\sum \Delta W_{Sp} = \sum \Delta W_{t,t+1} + \sum \Delta \Gamma_{t,t+1}^W \quad (4-26)$$

mit:

ΔW_{Sp}	Veränderung des Energie- und Kohlenstoffspeichers des Waldes
$\Delta W_{t,t+1}$	Energie- bzw. Kohlenstoffzuwachs im Wald in der Zeitperiode t bis t+1
$\Delta \Gamma_{t,t+1}^W$	Energie- bzw. Kohlenstoffverluste im Wald in der Zeitperiode t bis t+1

Unter Kenntnis von $W_{Sp, t=0}$ erhält man mit dieser Art der Bilanzierung neben den jährlichen Zuwächsen und Verlusten den $W_{Sp, t}$. Letztendlich resultiert aus diesen Berechnungen W_{Sp} am Ende der Modellierungszeit (Jahr 2020). Auf Grund der Einheitenkonsistenz wurde W_{Sp} im Rahmen der Energiebilanzierung in PJ und im Rahmen der Kohlenstoffbilanzierung in Mt CO₂eq angegeben.

Energiemodell

Im Energiemodell wurden die nachgefragten Endenergieträger, Primärenergieträger sowie die energetischen Verluste (Umwandlung in unerwünschte Energieformen) durch Umwandlungs- und Transportprozesse bilanziert. Es wurde ermittelt, wie sich die Nachfrage nach Primärenergieträgern mit der Endenergieträgernachfrage und den energetischen Verlusten in jeder Modellperiode verändert, wie in Gleichung (4-27) formuliert.

$$\sum \Delta PE = \sum \Delta EE_{t,t+1} + \sum \Delta \Gamma_{t,t+1}^E \quad (4-27)$$

mit:

ΔPE	Veränderung der Nachfrage nach Primärenergieträgern
$\Delta EE_{t,t+1}$	Veränderung der Endenergienachfrage in der Zeitperiode t bis t+1
$\Delta \Gamma_{t,t+1}^E$	Transport- und Umwandlungsverluste in der Zeitperiode t bis t+1

Für die CO₂eq-Bilanzierung wurde angenommen, dass Emissionen über Transport und Um-

wandlungsprozesse freigesetzt, aber nicht gespeichert werden können. Die CO₂eq-Bilanz wurde aus den über die Prozesse freigesetzten Emissionen in der Zeitperiode t bis t+1 berechnet. Hierzu zählen auch die Emissionen die bei der Umwandlung von Endenergie in nutzbare Energie der Haushalte entstehen.

Gesamtmodell

Die Veränderung der Energiebilanz des Gesamtmodells wurde anhand von Gleichung (4-28) formuliert. Sie berechnet sich aus der Veränderung des Energiespeichers im Wald und den Umwandlungs- und Transportverlusten im Energiesystem.

$$\sum \Delta G = \sum \Delta W_{Sp_{t,t+1}} + \sum \Delta \Gamma_{t,t+1}^E \quad (4-28)$$

mit:

ΔG	Veränderung der Energiebilanz des Gesamtmodells
$\Delta W_{Sp_{t,t+1}}$	Veränderung des Energiespeichers des Waldes in der Zeitperiode t bis t+1
$\Delta \Gamma_{t,t+1}^E$	Transport- und Umwandlungsverluste in der Zeitperiode t bis t+1

Die CO₂eq-Emissionen im Gesamtsystem errechnen sich anhand der nachfolgenden Gleichung.

$$\sum G^{CO_2eq} = \sum W^{CO_2eq}_{t,t+1} + \sum E^{CO_2eq}_{t,t+1} \quad (4-29)$$

mit:

G^{CO_2eq}	CO ₂ eq-Emissionen im Gesamtsystem
$W^{CO_2eq}_{t,t+1}$	CO ₂ eq Emissionen im Wald in der Zeitperiode t bis t+1
$E^{CO_2eq}_{t,t+1}$	CO ₂ eq aus Transport und Umwandlung in der Zeitperiode t bis t+1

4.6 Zusammenfassung

Zur gemeinsamen Abbildung des Energie- und Waldsystems über ein Gesamtsystem wurde das RES als Grundlage verwendet. Es zeigte sich, dass das RES alleine nicht ausreicht, um das Verhältnis von Zeit, Raum sowie Ereignissen im Waldsystem hinreichend genau abzubilden. Das RES wurde deshalb auf der Basis von zellulären Automaten weiterentwickelt. Zelluläre Automaten wurden mit dem RES verknüpft und in der Arbeit als zelluläre Güter bezeichnet. Zelluläre Güter sind vier dimensionale Matrizen zur Berechnung der Entwicklung von rezenten Ressourcen (Wälder und Böden), mit der die CO₂-Bilanz sehr detailliert aufgenommen und bis zur regionalen Ebene aggregiert wird. Zelluläre Güter wurden daher als dynamisch-komplexe

Energiespeicher definiert. Eine Region wird in ein Gitter mit quadratischen Zellen eingeteilt. Jeder Zelle werden die Topographie, der Boden zugeteilt. Zudem werden in jeder Zelle für jede Modellperiode die Veränderung der Bestände mit den Altersklassen bilanziert.

Um den Kohlenstoffhaushalt in Waldsystemen auf der Basis von zellulären Gütern zu bilanzieren, wurde das mathematische Modell NATURE formuliert und in MESAP integriert. NATURE ist ein ressourcenorientiertes Simulationsmodul, mit dem eine CO₂-Bilanzierung von Wäldern auf verschiedenen Standorten berechnet werden kann. Mit NATURE lassen sich auch stochastische Einflüsse (beispielsweise Waldbrand) auf das System und die CO₂-Bilanz bestimmen.

Auf Grund der Wechselwirkungen von Energie- und Waldsystem wurde ein Verfahren entwickelt, das es erlaubt, Zeitreihen im Energie- und Waldmodell dynamisch während eines Berechnungsprozesses zu aktualisieren und die Ergebnisse über eine Schleife wieder zurück in die nächste Modellperiode als Eingangsvariablen zu schreiben. Dazu wurden die Zeitreihen eines Modells nach einzelnen Modellperioden zerlegt und letztendlich wieder für die gesamte Modellierungszeit zusammengesetzt. Dieses Verfahren wurde als evolutionäres Lösen bezeichnet. Es zeigte sich, dass das evolutionäre Lösen und das Einmal-Lösen bei langen Modellierungszeiten ab 15 Jahren signifikante Unterschiede zeigt. Die Rechenzeiten sind bei jährlicher Zeitauflösung und 30-jähriger Modellierungszeit um den Faktor 30 höher. Bei kürzeren Modellierungszeiten kann auf das evolutionäre Lösen verzichtet werden. Der große Nachteil des evolutionären Lösens liegt in der praktischen Durchführung, weil bei jeder nachträglichen Veränderung in einer Strategie (zum Beispiel bei einem verbesserten Wirkungsgrad einer Technologie) das evolutionäre Lösen neu gestartet werden muss.

Auf der Basis der zellulären Güter, deren Berechnung mit NATURE und dem evolutionären Lösen wurde eine CO₂-Bilanzierung für das Gesamtsystem sowie für das Energie- und das Waldsystem ermöglicht.

5 Energie- und CO₂-Bilanzierung für Dar es Salaam in Tansania

In diesem Kapitel wird die Modellanwendung am Beispiel von Dar es Salaam in Tansania durchgeführt. Zunächst wird die Datenlage für Tansania und Dar es Salaam mit seinen Holzeinzugsgebieten dargestellt und die Modellierung der Energie- und CO₂-Bilanzierung beschrieben. Anschließend werden anhand von drei Szenarien mögliche zukünftige Entwicklungstendenzen aufgezeigt. Neben dem Basisszenario wird ein Szenario ohne Schutz der Ressourcen und ein drittes Szenario mit nachhaltiger Energie- und Forstwirtschaft berechnet. Die Ergebnisse der Modellrechnungen werden hinsichtlich des Energieträgerverbrauchs und ihrer CO₂-Bilanz analysiert. Die CO₂-, CH₄- und N₂O-Emissionen werden als CO₂-Äquivalente (CO₂eq) berechnet und im Text als „Emissionen“ beschrieben. Um den Einfluss des Bevölkerungswachstums auf die Emissionen zu untersuchen, werden die Szenarien im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse mit unterschiedlichen Wachstumsraten berechnet. Das Kapitel schließt mit einem Vergleich der Ergebnisse.

5.1 Daten für Dar es Salaam, Tansania

5.1.1 Bevölkerungs- und Wirtschaftsentwicklung

Tansania entstand 1964 aus Tanganyika und Sansibar. Die Hauptstadt ist Dar es Salaam (deutsch: Hafen des Friedens). Tansania hatte 2001 rund 33,7 Millionen Einwohner /Hofmeier, Mehler, 2002/. Die Volkszählung im Jahr 1988 ergab ein jährliches Bevölkerungswachstum von 2,8% /Mwandosya et al., 1999/. Die auf Grund der Landflucht seit Jahren stark steigende Bevölkerung von Dar es Salaam hat einen immer höheren Holzbedarf, weshalb die Waldressourcen schwinden und die zukünftige Holzversorgung der Haushalte unsicher ist /Frey, Neubauer, 2002/. Die Bevölkerung ist damit die treibende Größe für die Nachfrage nach Energieträgern in den Haushalten, so dass ihr möglicher Anstieg genauer hinterfragt wird.

Das zukünftige Bevölkerungswachstum wird von /CIA, 1999/, /Jambiya, 2001/, /Mwandosya et al., 1999/ und der /World Bank, 2002/ sehr unterschiedlich eingeschätzt. Auf Grund dieser Analysen wurden die drei Entwicklungen in Tabelle 5-1 berechnet.

Die Landflucht führte dazu, dass die Bevölkerung von Dar es Salaam von rund 1,2 Millionen Einwohner /Hossier, Richard, 1994/ im Jahr 1988 auf 3 Millionen Einwohner im Jahr 2000 /Malimbwi et al., 2001/ anstieg. Das entspricht einem durchschnittlichen jährlichen Bevölkerungswachstum von 7,8%. /Jambiya, 2001/ rechnet mit rund 3,3 Millionen Einwohnern, weil er die umliegenden Dörfer berücksichtigt.

Auf Basis einer Analyse der /World Bank, 2002/ wurde das moderate Bevölkerungswachstum ab 2000 mit einem durchschnittlichen Bevölkerungswachstum von 3% kalkuliert.

Andere Autoren rechnen mit einer stärker steigenden Bevölkerung, weil das Gesundheitswesen fortschrittlicher wird und die Kindersterblichkeit von 9,5% in 1999 /CIA, 1999/ auf 7% in den nächsten 20 Jahren reduziert werden kann /Jambiya, 2001/. Die verbesserte medizi-

nische Versorgung erhöht im Jahr 2020 die Lebenserwartung von 46,2 Jahren auf über 50 Jahre /CIA,1999/. /Jambiya, 2001/ unterstellt eine ähnliche Entwicklung für Dar es Salaam wie für Nairobi in den 80er Jahren und prognostiziert bis 2005 ein jährliches Bevölkerungswachstum von 7%, danach von 5% und geht ab dem Jahr 2015 von 2% aus. Diese Analysen wurden für die Berechnung des hohen Bevölkerungswachstums zu Grunde gelegt.

/Mwandosya et al., 1999/ gehen hingegen von einem geringeren Bevölkerungsanstieg von jährlich 2,8% aus. Es geht bereits ab dem Jahr 2005 auf 2,2% zurück. Die Autoren begründen dies mit der Aufnahmekapazität der Region und der Verelendung der Bevölkerung in der Umgebung von Dar es Salaam. Anhand dieser Analyse wurde die tiefer liegende Wachstumskurve berechnet.

Tabelle 5-1: Bevölkerungsentwicklungen von Dar es Salaam

Wachstum der Bevölkerung	Jahr				
	2000	2005	2010	2015	2020
Moderat (M)	3.300.000	3.825.604	4.882.548	5.390.728	5.951.799
Hoch (H)		4.628.421	5.907.168	6.521.991	7.200.805
Tief (T)		3.788.607	4.224.098	4.663.746	5.149.152

Der zweite wichtige exogene Parameter für das Modell ist das Wirtschaftswachstum, weil hiervon die Nachfrage nach Industriegütern und Dienstleistungen abhängt. Für die Industrie und das Gewerbe ist das Bruttoinlandsprodukt (BIP) die treibende Größe. Das Bruttoinlandsprodukt betrug 2002 rund 10,5 Mrd USD /AA, 2004/. /AA, 2004/ gibt die Steigerung des BIP zwischen 1996 und 2002 mit 4,6% an. Die Inflationsrate lag im Jahr 1996 bei 21%, konnte aber im Jahr 2003 auf 4,2% gedrückt werden (niedrigstes Niveau seit 25 Jahren) /AA, 2004/. Das Pro-Kopf-Einkommen betrug im Jahr 1990 rund 120 USD /Siebert, 1997/. /Hofmeier, Mehler, 2002/ beziffern das Pro-Kopf-Einkommen im Jahr 2001 auf 270 USD.

Da das BIP für die gesamte Volkswirtschaft eines Landes gilt, wird im Modell das anteilige BIP des Untersuchungsgebietes im Jahr 2000 in Höhe von 890 Millionen USD zu Grunde gelegt. Für die Modellierung werden für das BIP durchschnittliche, jährliche Steigerungsraten von 4,6% /AA, 2004/ angenommen.

5.1.2 Energiewirtschaftliche Situation in Tansania

Die Energiewirtschaftliche Situation in Tansania ist gekennzeichnet durch die starke Abhängigkeit von Rohstoffimporten und der uneingeschränkten Nutzung der vorhandenen Waldressourcen zur Deckung des Energiebedarfs in den Haushalten. Die tansanische Energiepolitik diskutiert seit 1990 über einen Nationalen Aktionsplan, mit dem die folgenden wesentlichen Ziele erreicht werden sollen:

- Erzeugung, Transport, Verteilung und Nutzung der Energie effizienter gestalten
- Ersatz erdölbasierter Produkte für Transport und Industrie durch Nutzung heimischer Energiressourcen
- Verstärkte Nutzung von erneuerbaren Energieträgern insbesondere der Wasserkraft, der natürlichen Gasressourcen, der heimischen Kohle und verstärkte Suche nach Öl
- Minimierung von Energiepreisschwankungen, Aufbau von Know-how für die Entwicklung von Energietechnologien, dauerhafte und sichere Energieversorgung
- Vermeidung der Übernutzung von natürlichen Ressourcen (vor allem der Land- und Forstwirtschaft) durch verbessertes Ressourcenmanagement und Einsatz von effizienteren Nutzungstechnologien

Sehr aussichtsreich ist die verstärkte Gasnutzung, weil im Gebiet um die Insel Songo Songo südöstlich von Dar es Salaam Erdgas gefunden wurde. Die geplante Gaspipeline nach Dar es Salaam soll ab 2004 fertig sein und ab 2005 zur Energieversorgung beitragen. Damit kann auch der tansanische Kraftwerkspark deutlich ausgebaut werden, wobei vor allem Dar es Salaam von der neuen Gaspipeline profitieren dürfte.

Die installierte elektrische Leistung der tansanischen Kraftwerke zur Elektrizitätserzeugung betrug 1990 rund 570 MW_{el} /CEEST, 1994/ und 2000 rund 771 MW_{el} /Wamukonja, 2001/. Davon waren im Jahr 2000 wegen technischen Mängeln jedoch nur 710 MW_{el} verfügbar. Es ergibt sich eine mögliche Elektrizitätserzeugung von rund 2,9 TWh pro Jahr bei einer Nutzungsdauer von 4.200 h/a. Der zusätzliche Elektrizitätsimport aus Kenia, Sambia und Uganda wurde für das Jahr 2000 mit 55 GWh angegeben und versorgt den Norden /Wamukonja, 2001/. Die CO₂-, CH₄- und N₂O-Emissionen spielen sehr unterschiedliche Rollen bei Verbrennungsprozessen. Den Hauptanteil machen die CO₂-Emissionen aus. Auf Basis des Primärenergiemix /BMW_i, 2003/ werden nach /Kaltschmitt, Reinhardt, 1997/ je MWh erzeugtem elektrischen Strom rund 0,76t CO₂ freigesetzt. Die CO₂-Äquivalente von CO₂, CH₄ und N₂O verteilen sich im Verhältnis 95:4:1. Die installierten Kraftwerksleistungen verteilten sich im Jahr 2000 wie folgt:

Tabelle 5-2: Kraftwerkspark von Tansania im Jahr 2000 /Wamukonja, 2001/

Kraftwerkstyp	installierte Leistung [MW _{el}]
Wasserkraftwerke	561
Gasturbinen	202
Dieselaggregate	2
Kohlekraftwerke	6

5.1.3 Holzeinzugsgebiet in Tansania und Großraum Dar es Salaam

In Abbildung 5-1 sind Tansania, Dar es Salaam, die geographische Verbreitung der Dry-Miombo-Bestände und Wet-Miombo-Bestände zu sehen, die in Kapitel 5.1.4 beschrieben werden.

Tansania hat eine Gesamtfläche von 942.742 km² /Mwandosya et al., 1999/ und ist topographisch von einem Hochplateau geprägt /Erdkunde-online, 2002/. Die Untersuchungsregion umfasst Dar es Salaam und seine Holzeinzugsgebiete. Dar es Salaam hat eine Fläche von 1.392 km². Die Stadtbehörde reservierte 1997 zusätzlich rund 945 km² für den Stadtausbau. Das Holzgebiet der Region umfasste im Jahr 2000 rund 6.595 km² /Malimbwi et al., 2001/, /Jam-biya, 2001/ und besteht aus mehreren Wäldern.

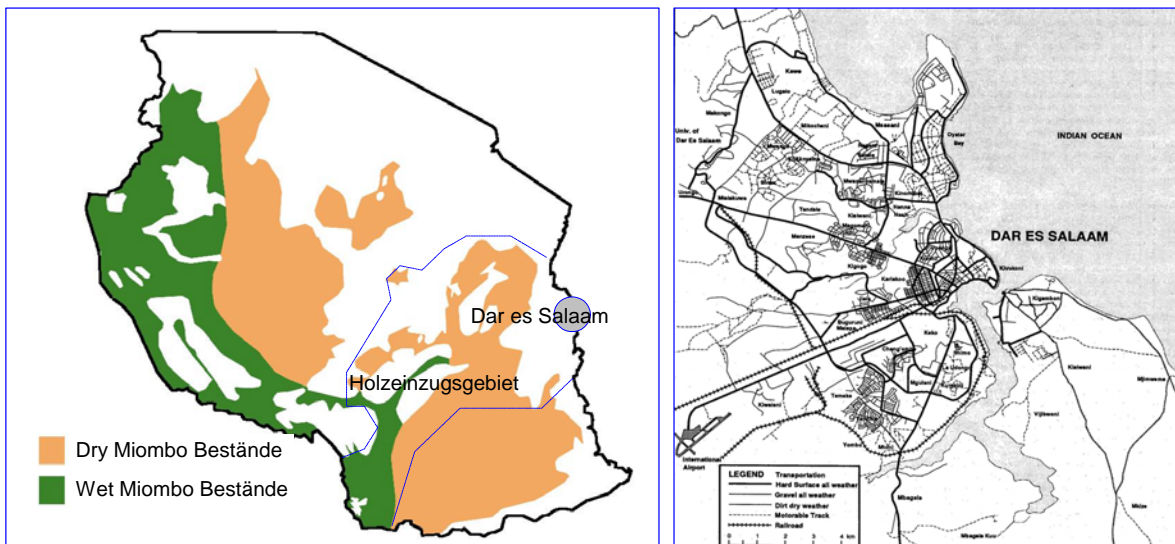


Abbildung 5-1: Miombo Bestände und Großraum Dar es Salaam nach /Hossier, Richard, 1994/

5.1.4 Böden und Bestände im Untersuchungsgebiet

Die Böden auf dem zentralafrikanischen Plateau lassen sich in Alfisols, Oxisols und Ultisols sowie Laterit einteilen /Chidumayo, 1997/. Im Untersuchungsgebiet kommen hauptsächlich Alfisols und Oxisols vor /Malimbwi et al., 2001/. In Tabelle 5-3 sind die Kohlenstoffgehalte im Boden nach /Chidumayo, 1997/, /Malimbwi et al., 2001/ und eigenen Berechnungen für das Jahr 1990 zusammengefasst.

Tabelle 5-3: Kohlenstoffgehalte im Boden für das tansanische Untersuchungsgebiet aus 1990

Bodentiefe [cm]	Alfisols [t C/km ²]	Oxisols [t C/km ²]
1-10	619	609
11-30	291	288
31-60	333	348
61 - 150	250	251
Summe	1.493	1.498

Wie in Tabelle 5-3 zu sehen ist, weisen beide Böden vergleichbare Werte auf. Alfisols besteht in der obersten Bodenschicht aus 77% Sand, 11% Lehm und 12% Schluff (Silt) /Chidumayo,

1997/. Damit handelt es sich genauso wie beim Oxisols um einen schweren Boden, dessen tiefere Schichten (Bodenhorizonte) durch Winderosion kaum abtragbar sind.

Der Boden umfasst die gesamte Fläche des Waldsystems im Untersuchungsgebiet. Die Profiltiefe reicht bis zu 1,5 m. Durch Erosion ist vor allem der obere Bodenhorizont bis 10 cm gefährdet /Hamilton, Bensted-Smith, 1989/. Die mittlere Hangneigung wird mit 4% angenommen.

Im Jahr 1990 waren in Tansania etwa 50% der Fläche Waldland, 40% Wiesen- oder Weidefläche und 6-8% kultiviert /Mwandosya et al., 1999/. Die meist verbreitete Vegetation sind nach /Braatz et al., 1996/, /Malimbwi et al., 2001/ die Miombo-Bestände sowie das bewaldete Grasland. Es gibt die Dry-Miombo-Bestände, die nach /Hamilton, Bensted-Smith, 1989/ naturgemäß auf Alfisols vorkommen und die Wet-Miombo-Bestände, die auf Oxisols heimisch sind. Sie unterscheiden sich im Wesentlichen hinsichtlich des Standortes (Topographie und Boden), in der Baumartenzusammensetzung sowie dem jährlichen Zuwachs. Die Bäume beider Miombo-Bestände werden selten älter als 100 Jahre und erreichen kurze Zeit vorher Höhen von 25 m /Chidumayo, 1997/. Beide Miombo-Bestände weisen drei Stockwerke auf. Im obersten Stockwerk sind die Hauptbaumarten zu finden, die in der Regel für die Holznutzung bzw. Verkohlungs eingeschlagen werden. Tabelle 5-4 stellt die typische Zusammensetzung von natürlichen Miombo-Beständen (Primärwälder) dar und zeigt ihre Biodiversität (Artenvielfalt).

Tabelle 5-4: Baumarten und Vegetation von Miombo-Beständen /Borota, 1991/, /ICRAF, 2004/

Stockwerk	Botanische Bezeichnung der Baumarten und der Vegetation	Handels- oder Herkunftsname
<i>oberstes:</i>		
- Brachystegia	<i>Brachystegia spicaeformis Benth.</i>	Beanpod tree (engl.), Myombo
- Isoberlinia	<i>Isoberlinia tomentosa Harms</i>	Julbernardia (engl.), Mtondo
- Pterocarpus	<i>Pterocarpus erinaceus Lam.</i>	Apepe
- Afromosia	<i>Afromosia elata Harms</i>	Kokrodua, Aformosia
- Afzelia	<i>Afzelia sp. Harms</i>	DoussiÈ, Afzelia
- Burkea,	<i>Burkea africana Hook.</i>	Burkea, Wild syringa (engl.)
- Xeroderris	<i>Xeroderris stuhlmannii Taub.</i>	Wing pod (engl.), Mnyinga
- Erythrophleum	<i>Erythrophleum sauevolens Brenan</i>	Mbaraka mkuu, Mkelekele
<i>mittleres:</i>		
- Sterculia genera	<i>Sterculia africana Fiori</i>	Honze, Honzya
- Uapaca	<i>Uapaca spcc. Muell. Arg.</i>	Wild loquat (engl.), Mkusu
- Strychnos	<i>Strychnos spinosa Lam.</i>	Elephant orange (engl.), Mpapa
- Monotes	<i>Monotes kerstingii Gigl.</i>	Chipampa
- Diospyros	<i>Diospyros mespiliformis Hochst.</i>	African ebony (engl.), Mgiriti
- Faurea	<i>Faurea saligna Harv</i>	Beachwood (engl.)
- Pseudolachnostylis	<i>Pseudolachnostylis maprouneifolia Pax</i>	Mpujnpujn
- Terminalia	<i>Terminalia spinosa Engl.</i>	Spiny terminalia (engl), Mwangati
- Ostryoderris	<i>Ostryoderris stulmannii Dunn.</i>	(ohne Bezeichnung)
- Combretum genera	<i>Combretum collinum Fres.</i>	Bushwillow, Boswilg
<i>unteres:</i>	sehr viele Arten; daher nicht aufgelistet	Sträucher, Gräser und Kräuter

Aufgrund der Biodiversität werden die vorhandenen natürlichen Miombo-Bestände im Modell nicht genutzt. In Tansania stehen einige dieser Primärwälder ohnehin unter „Naturschutz“ oder werden aufgrund von Legenden („Geisterwälder“) eher gemieden. Außerdem wird im Modell unterstellt, dass sich Holzzuwachs und -verluste durch Verrottung ausgleichen, so dass in der Modellierungszeit kein zusätzliches CO₂ gebunden wird.

5.2 Modellierung des Gesamtsystems

Das Gesamtsystem ist von der Energienachfrage bis zur Entwicklung der Waldressourcen berechnet. Die Bereiche der Energienachfrage und der -bereitstellung sind mit PlaNet, die Ressourcenentwicklung des Waldes ist mit NATURE berechnet.

Das Referenzenergiesystem (RES) zur Abbildung des Nachfragebereichs ist primär untergliedert in die Sektoren Haushalt, Industrie und Gewerbe sowie Transport. Die Industrie ist in die Zementherstellung sowie in die Papier- und Zellstoffproduktion unterteilt. Im Gewerbe sind die Dienstleistungsunternehmen und die Behörden zusammengefasst. Die Haushalte sind nach ländlichen und städtischen Haushalten strukturiert, da die ländliche Bevölkerung stärker vom Holz abhängig ist als die Stadtbevölkerung. Der Bereich der Bereitstellung ist untergliedert in die Elektrizitätserzeugung und die Erzeugung von biogenen Brennstoffen aus dem Wald. Die Elektrizitätserzeugung erfolgt bis ins Jahr 2005 im Wesentlichen durch Wasserkraft, Gasturbinen sowie Dieselaggregate. Das einzige tansanische Kohlekraftwerk versorgt den Norden und liegt bis 2005 ausserhalb der betrachteten Systemgrenzen. Allerdings soll es ab 2010 ausgebaut werden und kann auch zur Versorgung von Dar es Salaam beitragen. Über die in das RES integrierten zellulären Güter sind die unterschiedlichen Waldressourcen mit dem Energiesystem verbunden.

Die Simulation erfolgt in fünf Zeitschritten mit den Stützjahren 1990, 1995, 2000, 2005, 2010, 2015 und 2020. 1990 wurde als Basisjahr gewählt, weil geeignete Daten vorliegen und es das Basisjahr im Kioto-Protokoll ist. Zudem lässt sich aus den Auswertungen von 1990 bis 2000 der mittelfristige Trend der Vergangenheit erkennen. Die Untersuchung und der Vergleich unterschiedlicher Entwicklungen des Energie- und Waldsystems erfolgt mit Hilfe der Szenariotechnik.

5.3 Szenarien

Um die Wirkungen von äußeren Einflüssen und von Maßnahmen auf die Energie- und Kohlenstoffbilanz bewerten zu können, werden Szenarien definiert. Ein Szenario besteht in der vorliegenden Fallsudie aus folgenden Komponenten:

Strategien und Maßnahmen

- Durch den Modellierer beeinflussbar

und

Sozio-ökonomische Randbedingungen

- Nicht durch den Modellierer beeinflussbar

In der Fallstudie werden drei verschiedene Szenarien für das Gesamtsystem aus Energie- und Forstwirtschaft in Dar es Salaam miteinander verglichen. In Abbildung 5-2 sind die Kennzeichen, Rahmenbedingungen und Maßnahmen der Szenarien dargestellt, die in Kapitel 5.3.1 bis Kapitel 5.3.3 beschrieben werden.



Abbildung 5-2: Kennzeichen, Rahmenbedingungen und Maßnahmen der Szenarien

Jedes Szenario stellt einen möglichen Weg der energie- und forstwirtschaftlichen Entwicklung des Gesamtsystems dar. In den Szenarien werden die unterschiedlichen Annahmen über die Entwicklung unsicherer Einflussfaktoren beschrieben. In allen Szenarien steigt das jährlich durchschnittliche BIP um 4,6%. Die Szenarien sind mit dem moderaten Bevölkerungswachstum aus Tabelle 5-1 verknüpft.

5.3.1 Das Basisszenario (BAS)

Das Basisszenario (BAS) ist der Vergleichsmaßstab für alle Szenarien und schreibt die Entwicklung aus der Vergangenheit in die Zukunft fort. Die Diskrepanz zwischen technischen Möglichkeiten der Industrieländer und herkömmlich traditioneller Nutzung ist in Afrika besonders groß. Da Umweltschutzmaßnahmen eine untergeordnete Rolle spielen, ergeben sich eingeschränkte Möglichkeiten zur Reduktion von Treibhausgasen. Im BAS werden Maßnahmen realisiert, für die kein aufwändiger Kraftwerks- und Netzbau mit hohen Investitionen erforderlich sind.

Daher gibt es im BAS keinen wesentlichen Kraftwerksausbau. Allerdings werden die vorhandenen Kraftwerke im Jahr 2005 überholt, so dass die gesamte Kraftwerksleistung von 771 MW_{el} verfügbar ist, um den Elektrizitätsbedarf zu decken. Zusätzlich werden zukünftig vor allem auch dezentrale Diesellaggregate und Gasturbinen zur Elektrizitätserzeugung genutzt. Der Staat setzt allerdings im BAS wenig finanzielle Ressourcen ein, um die Energieverteilung zu verbessern. Geberländer subventionieren keine Maßnahmen zur Verbesserung der Energieinfrastruktur.

Im Bildungsbereich werden jedoch einige Anstrengungen unternommen, um die Bevölkerung für die prekäre Lage der Energieversorgung zu sensibilisieren. Eine Voraussetzung dazu ist der politische Wille, das Bildungsniveau anzuheben. Es wird unterstellt, dass die notwendigen finanziellen Ressourcen für Schule und Ausbildung aufgebracht werden. Die Zusammenhänge von Energieträgerverbrauch und Auswirkungen auf die natürlichen Ressourcen werden der Bevölkerung verständlich gemacht. In universitären Weiterbildungsveranstaltungen werden Personen auf ihren Lehreinsatz in Städten und Dörfern der Region vorbereitet.

Es wird von einer weiterhin uneingeschränkten Holznutzung ausgegangen. Die Holzpreise bleiben inflationsbereinigt stabil, so dass die Energieholznachfrage linear mit dem Bevölkerungswachstum steigt.

Um diese Nachfrage langfristig decken zu können, werden verschiedene Maßnahmen im Energie- und Waldsystem eingeführt und kombiniert.

Die Maßnahmen im Waldsystem liegen in einer nachhaltigen Forstwirtschaft mit Naturverjüngung sowie Feuerkontrollen auf 8% der Waldflächen. Naturwälder werden unter Schutz gestellt und ab 2010 jährlich rund 0,5% der devastierten Flächen in Energieholzplantagen (Eukalyptus) überführt.

Weitere Maßnahmen zur Reduktion des Energieträgerverbrauchs lassen sich vor allem in

den Haushalten durchführen. Hier werden zukünftig zwei verbesserte Holzkohleöfen eingesetzt. Dadurch sinkt der Anteil von traditionellen Metallholzkohleöfen mit einem thermischen Wirkungsgrad η_{th} von 22,8% /van Asperen, 2001/. Die verbesserten Holzkohleöfen sind der Straight-Wall-Jiko-Bora mit η_{th} von 36,5% sowie der Double-Liner-Jiko-Bora mit η_{th} von 44,3% /van Asperen, 2001/. Beide Öfen bestehen aus einer äußeren Metallhülle und einem keramischen Feuertopf, die durch eine Isolationsschicht (aus Vermiculit, Zement und Reisspelzenasche /van Asperen, 2001/) verbunden sind. Das reduziert die Wärmeverluste durch die Metallhülle.

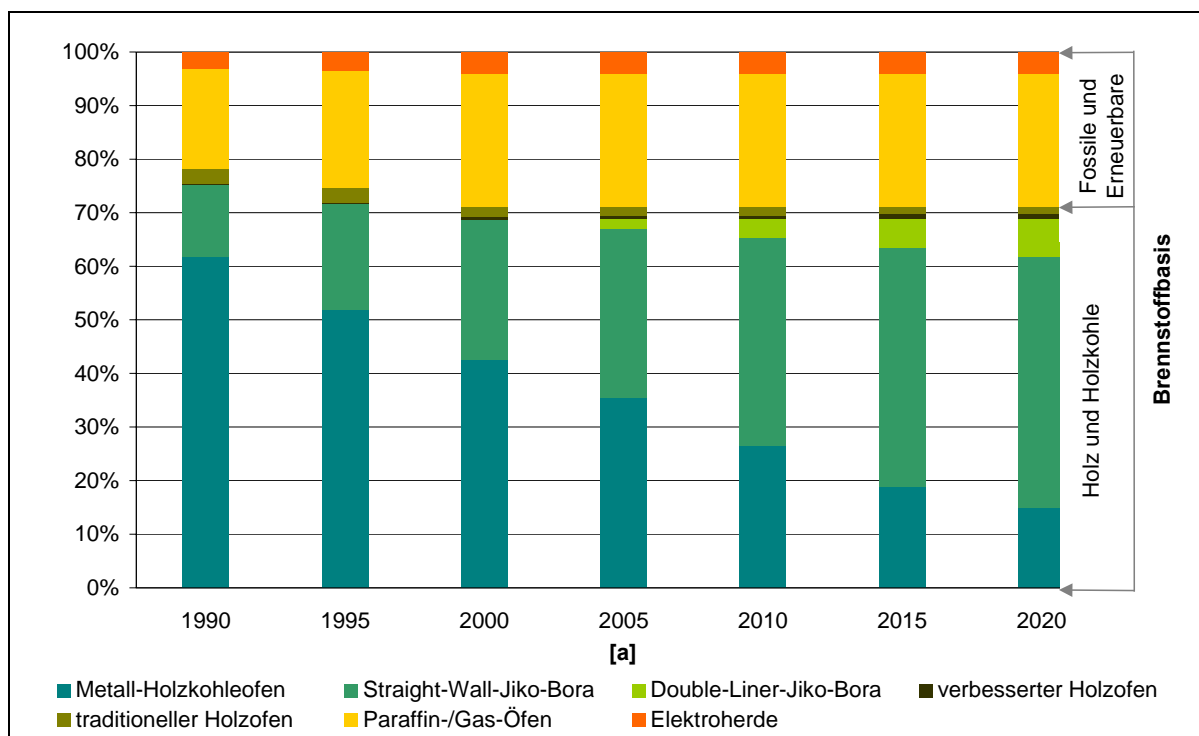


Abbildung 5-3: Marktanteile verschiedener Ofentypen im BAS

Nach TaTEDO (Traditional Energy Development and Environment Organisation) in Dar es Salaam wird insbesondere der Straight-Wall-Jiko-Bora wegen seines günstigen Preis-Leistungs-Verhältnisses den zukünftigen Ofenmarkt dominieren /Sawe, 2001/. Die Marktanteile von traditionellen Holzöfen (Drei-Steine-Herde) können gemäß /Sawe, 2001/ zu Gunsten von verbesserten Holzöfen mit Metallhülle und den Holzkohleöfen zurückgeschraubt werden. Zur Reduktion des Holzverbrauchs werden zudem effizientere Meilertypen eingesetzt. Die Veränderung der Marktanteile der Meilertechnologien ist in Abbildung 5-4 zu sehen.

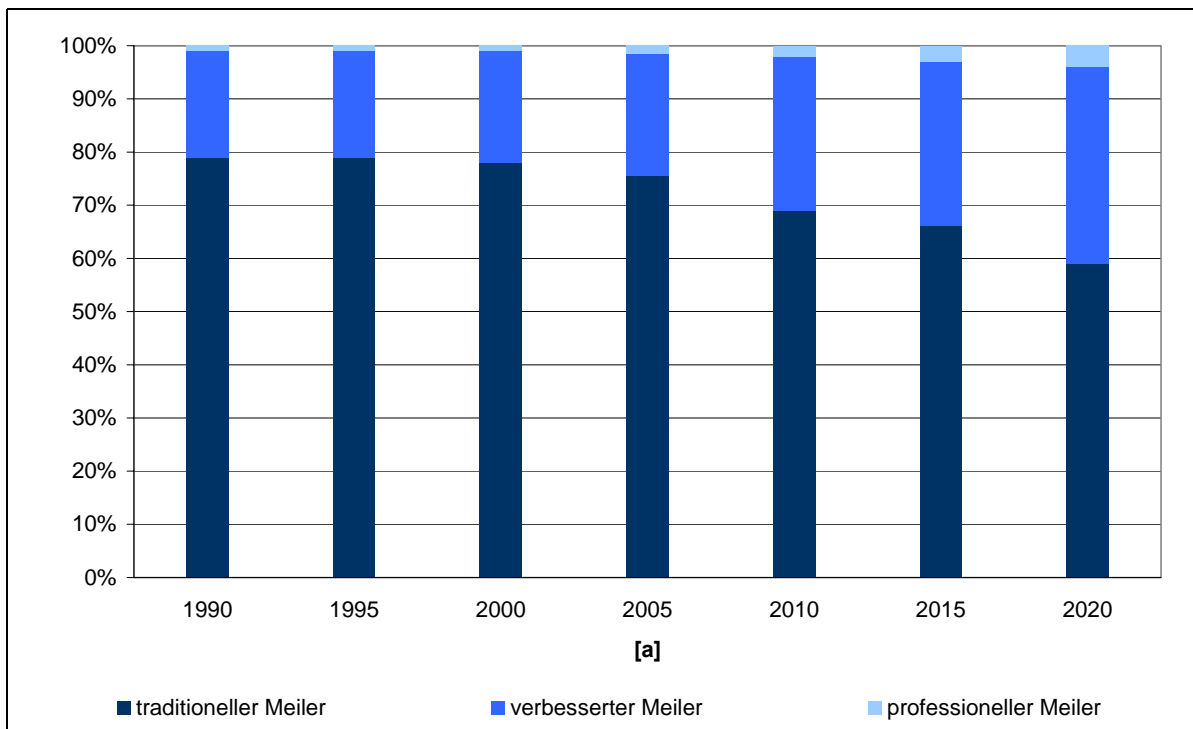


Abbildung 5-4: Marktanteile der Meilertechnologien im BAS

Der Marktanteil der verbesserten Meiler steigt auf 35% im Jahr 2020 an, während der Anteil der traditionellen Meiler auf 59% zurückgeht. Die Meilertypen unterscheiden sich wesentlich durch den Aufbau und den notwendigen Zeitaufwand. Vor allem für den Aufbau eines professionellen Meilers ist der Zeitaufwand von 2 bis 3 Wochen etwa doppelt so hoch wie für den traditionellen Meiler.

5.3.2 Szenario ohne Schutz der Ressourcen (ORS)

Das ORS verfolgt den Zweck, unter schwierigen Rahmenbedingungen die Konsequenzen von unterlassenen Maßnahmen auf den Verbrauch von Energieträgern und der Freisetzung von Emissionen aufzuzeigen. In diesem Szenario wird deshalb davon ausgegangen, dass der Holzverbrauch in den Städten zur Deckung des Energiebedarfs unvermindert anhält, ohne dass die Marktanteile der verbesserten Technologien weiter zunehmen.

Die Ansätze einer Energie- und Ressourcenplanung aus dem Basisszenario lassen sich auf Grund geringer finanzieller Mittel und fehlendem Know-how nicht fortführen. Einführungskampagnen für verbesserte Technologien scheitern. Die Einführung verbesserter Ofentypen stagniert auf dem Niveau des Jahres 2000, wie in Abbildung 5-5 dargestellt, so dass Ofentypen mit geringeren Wirkungsgraden weiterhin hohe Marktanteile behalten. Dadurch werden Holzressourcen stärker beansprucht als im Basisszenario. Die Marktanteile für Elektroöfen sowie für Gas- und Paraffinöfen verschieben sich gegenüber dem Basisszenario nicht.

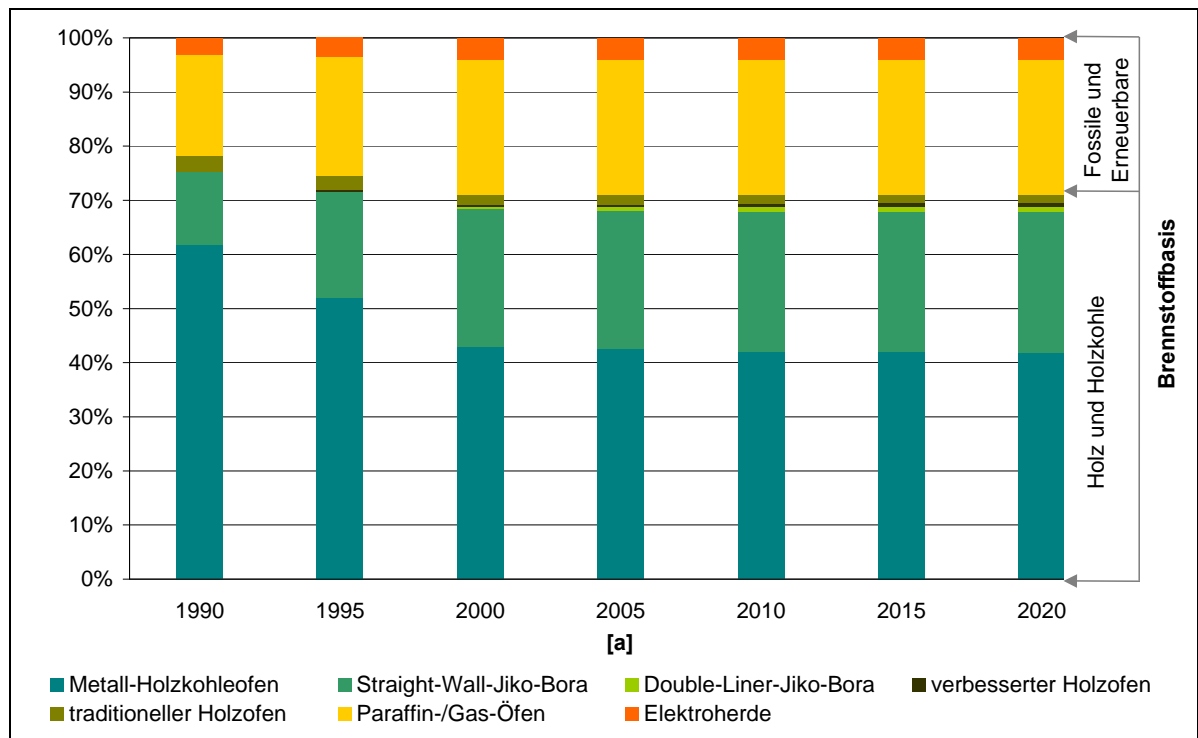


Abbildung 5-5: Marktanteile verschiedener Ofentypen im ORS

Die Verkohlung wird ab dem Jahr 2005 immer noch zu 77% mit traditionellen Meilern durchgeführt, wie in Abbildung 5-6 zu sehen ist, so dass mehr Holz für die Verkohlung notwendig ist als im Basisszenario.

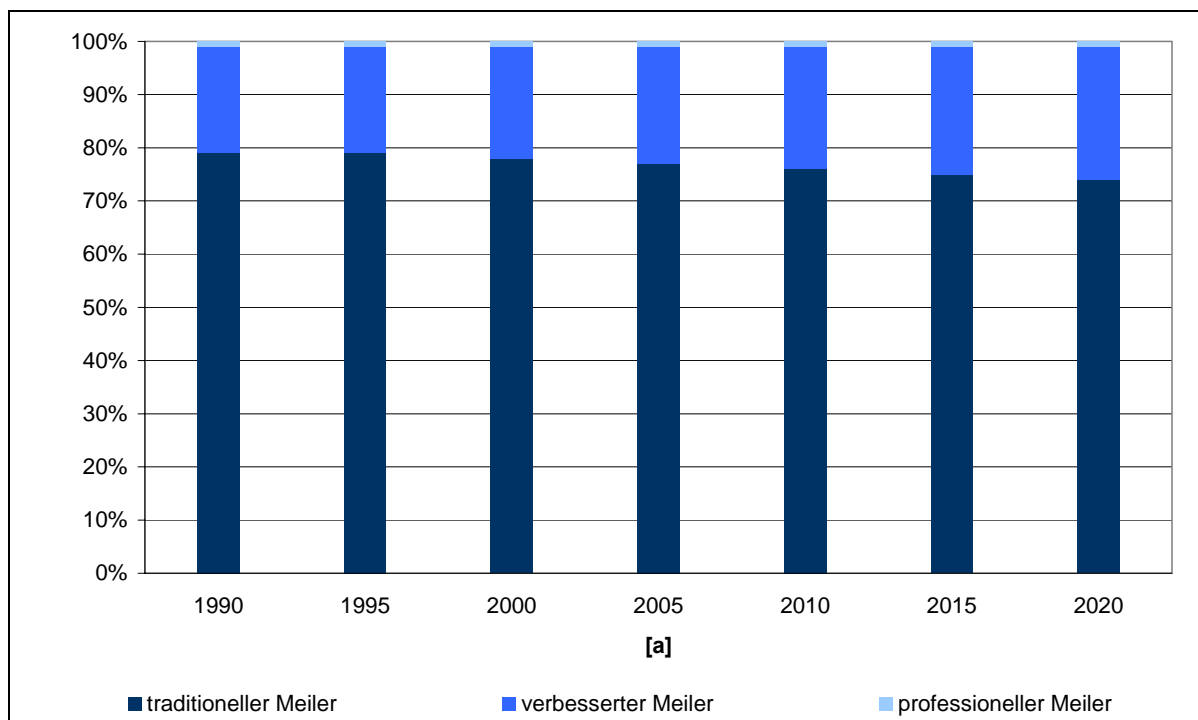


Abbildung 5-6: Marktanteile der Meilertechnologien im ORS

Die Holznachfrage aus dem Industriesektor und dem holzverarbeitenden Gewerbe bleibt auf dem Niveau des BAS. In der Forstwirtschaft werden Feuerkontrollen ebenfalls auf 8% der Waldflächen eingeleitet. Ab dem Jahr 2010 werden Eukalyptusplantagen zur Versorgung der Papier- und Zellstoffindustrie angebaut, da zu befürchten ist, dass die Waldressourcen zur Deckung des Holzbedarfs nicht mehr ausreichen.

5.3.3 Szenario mit nachhaltiger Energie- und Forstwirtschaft (NAP)

Das NAP (auf der Basis eines nationalen Aktionsplans) berücksichtigt die Auswirkungen einer veränderten Energie- und Umweltpolitik in Tansania. Der Einsatz regenerativer Energieträger und effizienterer Energietechnologien sowie die Nutzung bestehender Potenziale erneuerbarer Energieträger und Technologien werden im NAP realisiert. Es wird unterstellt, dass Geberländer den Ausbau von Elektrizitätsnetzen, den Kraftwerksausbau sowie Einführungskampagnen von Elektroöfen fördern.

Infolge dessen ist eine weitreichende Umstellung auf Elektroöfen notwendig. Im Jahr 2005 beträgt der Anteil der Elektroöfen 5% und wird bis zum Jahr 2020 auf 10% zu Lasten der Holzkohleöfen aufgestockt. Die Paraffin- und Gasofentypen werden mit 25% auf dem Niveau des Basisszenarios gehalten, da einerseits davon ausgegangen wird, dass ein höherer Marktanteil nicht realistisch ist /Sawe, 2001/. Andererseits erhöhen sich die Marktanteile der Gasöfen wegen der Gasversorgung durch die Songo-Songo-Erdgaspipeline zu Lasten der Paraffinöfen. In Abbildung 5-7 sind die Marktanteile der einzelnen Öfen dargestellt.

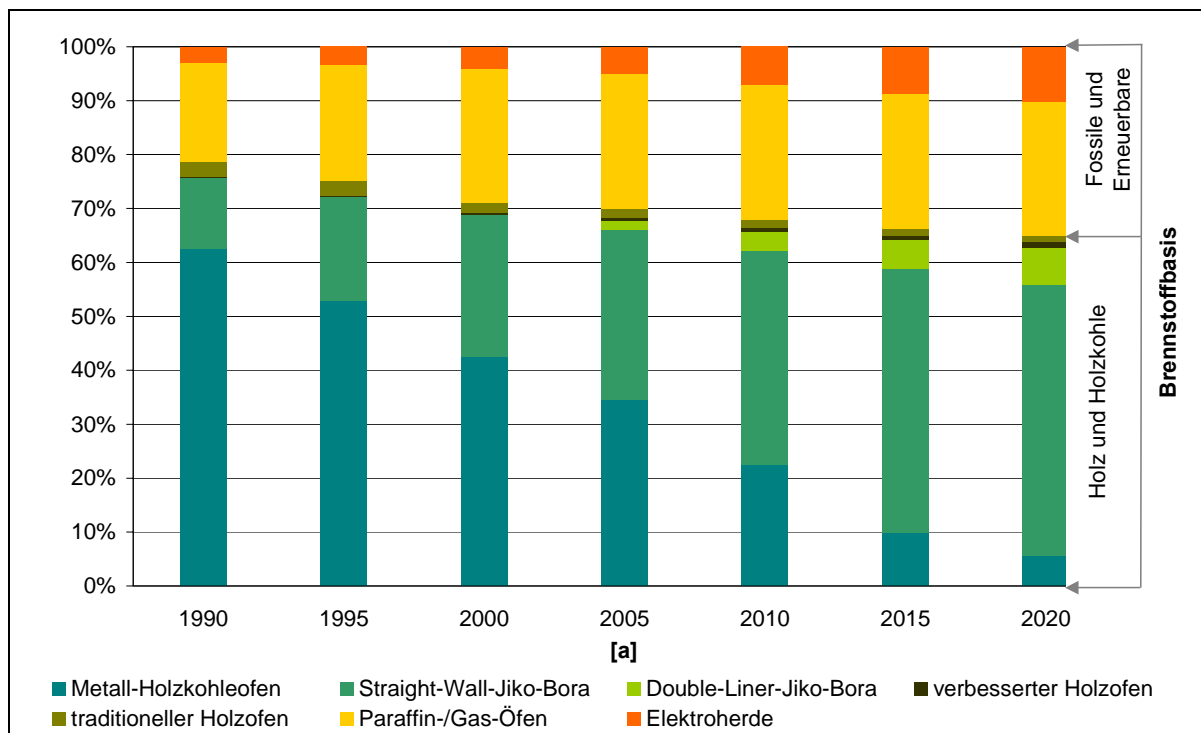


Abbildung 5-7: Marktanteile verschiedener Ofentypen im NAP

/Sawe, 2001/ geht davon aus, dass der Marktanteil der verbesserten und professionellen Meiler im Holzeinzugsgebiet auf nahezu 100% ansteigen kann, wenn entsprechende Schulungsmaßnahmen vor Ort stattfinden. Durch den wesentlich höheren Wirkungsgrad von etwa 25% im Vergleich zu durchschnittlich 15% bei traditionellen Meilertypen können neben dem Holzverbrauch auch die Emissionen gesenkt werden /Sawe, 2001/. /Chidumayo, 2001/ geht hingegen davon aus, dass einige Köhler weiterhin den traditionellen Meiler verwenden und sein Marktanteil im Jahr 2020 mindestens 15% betragen wird, wie in Abbildung 5-8 zu sehen ist.

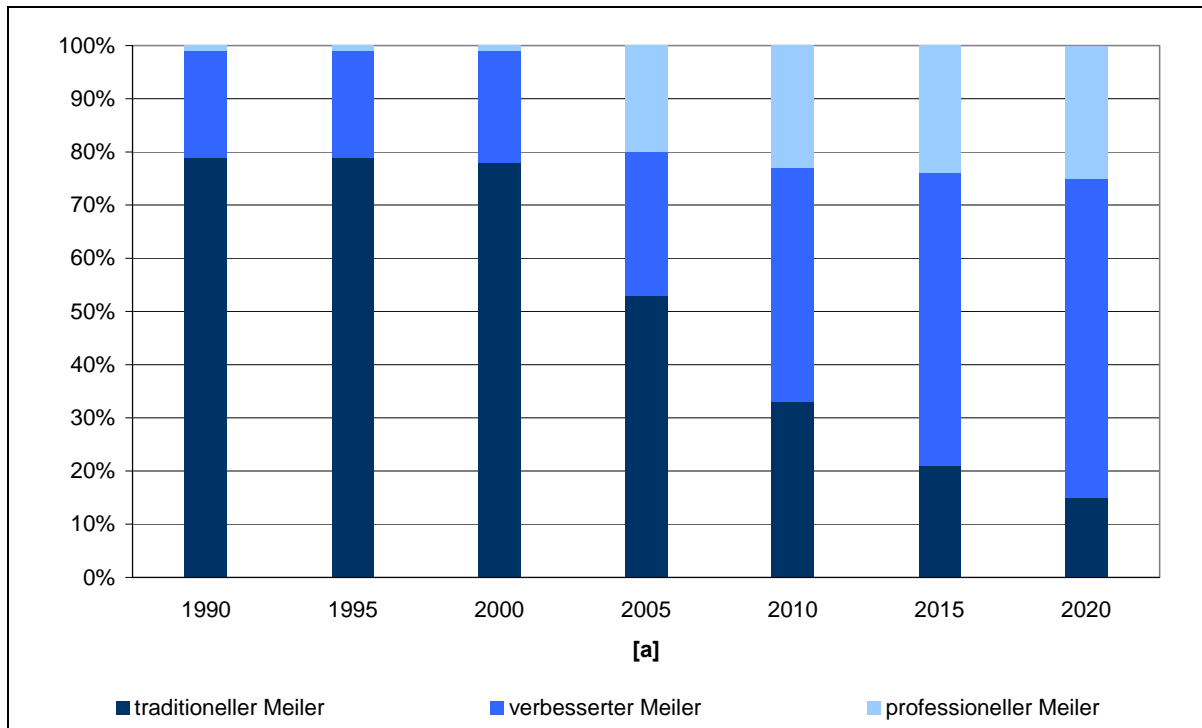


Abbildung 5-8: Marktanteile der Meilertechnologien im NAP

Die Waldflächen können sich durch Einsatz der verbesserten Technologien stärker regenerieren. Die Umsetzung des Aktionsplans soll schrittweise ab 2005 durchgeführt werden /Wamukonja, 2001/. Es sind zwar weitreichende Strategien im Kraftwerksbau und beim Einsatz erneuerbarer Energieträger vorgesehen, allerdings muss der Ausbau von regenerativen Kraftwerken in Tansania mittelfristig geplant und langfristig durchgeführt werden. So dauert eine tiefgreifende Veränderung der Energieinfrastruktur erfahrungsgemäß mindestens zehn Jahre. Die notwendigen Maßnahmen zur Verbesserung werden ab 2005 in den folgenden zehn Jahren realisiert. Dadurch lassen sich die vollständigen Auswirkungen auf das Gesamtsystem erst ab 2015 erkennen. In diesem Szenario werden die Wasserkraft ausgebaut, als „Back-Up“ verstärkt Dieselaggregate eingesetzt und vor allem Gaskraftwerke gebaut, deren Anteil an der Elektrizitätserzeugung im Jahr 2020 rund 25% ausmacht. Zur Elektrizitätserzeugung aus Biomasse (Maisstengel, Kaffeehülsen, Reisspelzen, Holz) trägt ab 2015 zusätzlich ein Biomassekraftwerk mit 1MW_{el} und einem Wirkungsgrad η_{el} von 30% /Jungbluth et al. 2002/ bei. Zudem wird ein Kohlekraftwerk gebaut, das ab 2015 auch Dar es Salaam mit Elektrizität versorgt.

5.4 Ergebnisse der Energie- und CO₂-Bilanz der Modellrechnungen

Im diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Modellrechnungen für das Basisszenario (BAS), für das Szenario ohne Ressourcenschutz (ORS) sowie für das Szenario mit nachhaltiger Energie- und Forstwirtschaft auf der Basis eines nationalen Aktionsplans (NAP) miteinander verglichen. Die Analyse erstreckt sich auf die Nachfrage nach End- und Primärenergieträgern, die Waldentwicklung sowie die Emissionen. Die Emissionen werden zudem im Rahmen einer Baselinebetrachtung analysiert. Die Ergebnisse der berechneten Szenarien sind als Basis für eine qualitative Betrachtung zu beurteilen und stellen keine Prognose einer zukünftigen Entwicklung dar.

Um die Auswirkungen des Bevölkerungswachstums auf die Emissionen zu bestimmen, werden die Szenarien mit jeder Bevölkerungsentwicklung von Tabelle 5-1 kombiniert und damit eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt.

5.4.1 Nachfrage nach Endenergieträgern

Die Nachfrage nach Endenergieträgern beträgt im Jahr 1990 rund 13,1 PJ und steigt im BAS im Jahr 2020 auf rund 39,7 PJ an, sinkt im NAP auf 37,1 PJ und steigt im ORS auf über 50 PJ, wie in Abbildung 5-9 dargestellt ist.

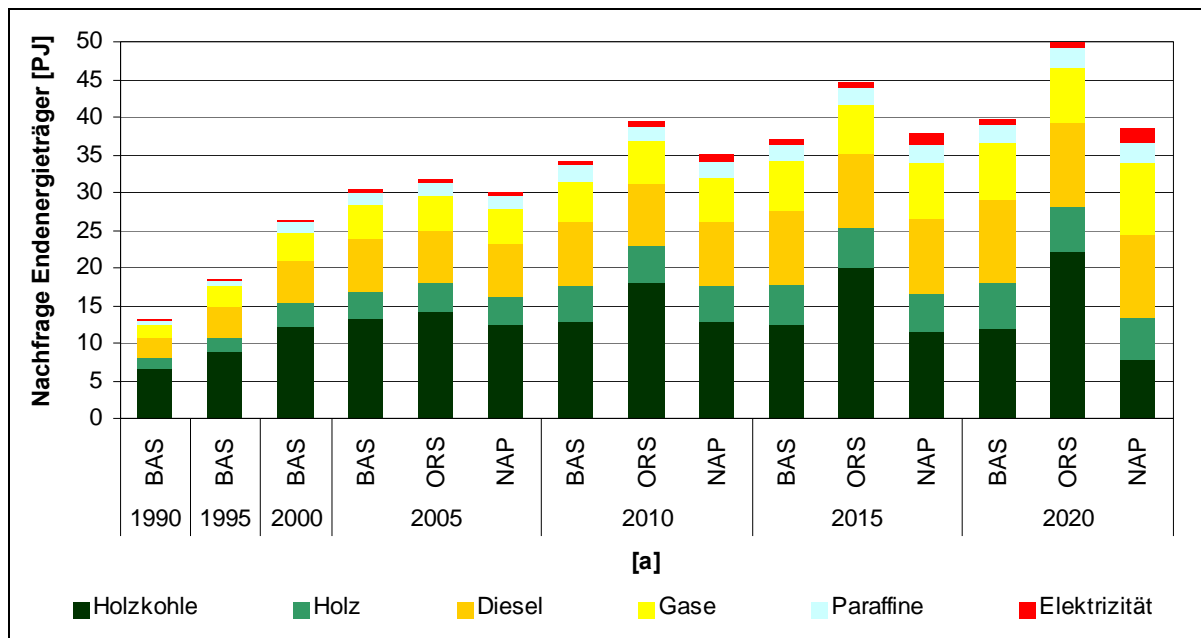


Abbildung 5-9: Entwicklung der Endenergienachfrage nach Energieträgern

Holzkohle hat im Jahr 1990 einen Anteil von rund 51%. Die Entwicklung zeigt, dass sie im ORS bis zum Jahr 2020 den dominanten Anteil an der Nachfrage an Endenergieträgern mit rund 44% behält, während ihr Anteil im BAS auf 30% und im NAP auf 20% fällt. Die absolute Nachfrage nach Holzkohle im Jahr 1990 beträgt 6,7 PJ und steigt im BAS auf rund 12 PJ im

Jahr 2020. Hierfür ist der Bevölkerungsanstieg hauptverantwortlich. Im ORS ist die Nachfrage nach Holzkohle mit über 20 PJ fast doppelt so hoch und geht wesentlich auf die unveränderten schlechten Wirkungsgrade der eingesetzten Meilertechnologien und Öfen zurück. Im NAP hingegen beträgt die Nachfrage nach Holzkohle im Jahr 2020 noch 7,7 PJ und liegt 1 PJ über dem Jahr 1990.

Diesel hat im Jahr 1990 einen Anteil von gut 20%. In allen drei Szenarien ist die Nachfrage nach Diesel im Jahr 2020 mit etwa 11 PJ vergleichbar hoch. Allerdings werden vor allem im NAP verstärkt Dieselaggregate betrieben und die Ernte zunehmend mechanisiert während der Transport von Holz und Holzkohle reduziert ist. Im ORS werden vorwiegend manuelle Bereitstellungsverfahren angewandt, so dass die Nachfrage nach Diesel nicht wesentlich steigt.

Der Anteil von Gas steigt in der Modellierungszeit ebenfalls erheblich an, weil in der Industrie mehr Gas genutzt und in den Haushalten zunehmend auf Gas umgestellt wird. Im Jahr 1990 hat Gas einen Anteil von gut 13% und steigt im BAS im Jahr 2020 auf 18,6%, im NAP auf 24,4%. Hinzu kommt ein stark ansteigender Verbrauch von Paraffin und Kerosin.

Im Jahr 1990 hat die Elektrizität einen Anteil von unter 1% und erhöht sich im NAP auf 4,6% im Jahr 2020, weil zunehmend Elektroöfen in den Haushalten eingesetzt werden und die Industrie zunehmend Zellstoff produziert.

Der Anteil der fossil erzeugten Endenergieträger beträgt im Jahr 2020 im NAP über 60%. Damit ist zwar der Anteil der fossil erzeugten Energieträger im Vergleich zu den anderen Szenarien am höchsten, die absolute Nachfrage nach Endenergieträgern ist allerdings am geringsten. Die Auswirkungen der Nachfrage der Endenergieträger auf den notwendigen Einsatz von Primärenergieträgern wird im nächsten Abschnitt beschrieben.

5.4.2 Nachfrage nach Primärenergieträgern

Die Nachfrage nach Primärenergieträgern wird in den drei Szenarien bis zum Jahr 2015 vom Waldholz dominiert, wie in Abbildung 5-10 abzulesen ist.

Allerdings nimmt der Anteil des Waldholzes an der gesamten Nachfrage ab dem Jahr 2005 im NAP deutlich ab. Sein Anteil an der gesamten Nachfrage von Primärenergieträgern liegt im Jahr 2020 bei 41% und liegt deutlich unter dem Anteil aus dem Jahr 2000 von 78%. Steinkohle hat im NAP ab 2015 einen Anteil von 0,03% und ist daher in der Abbildung nicht erkennbar.

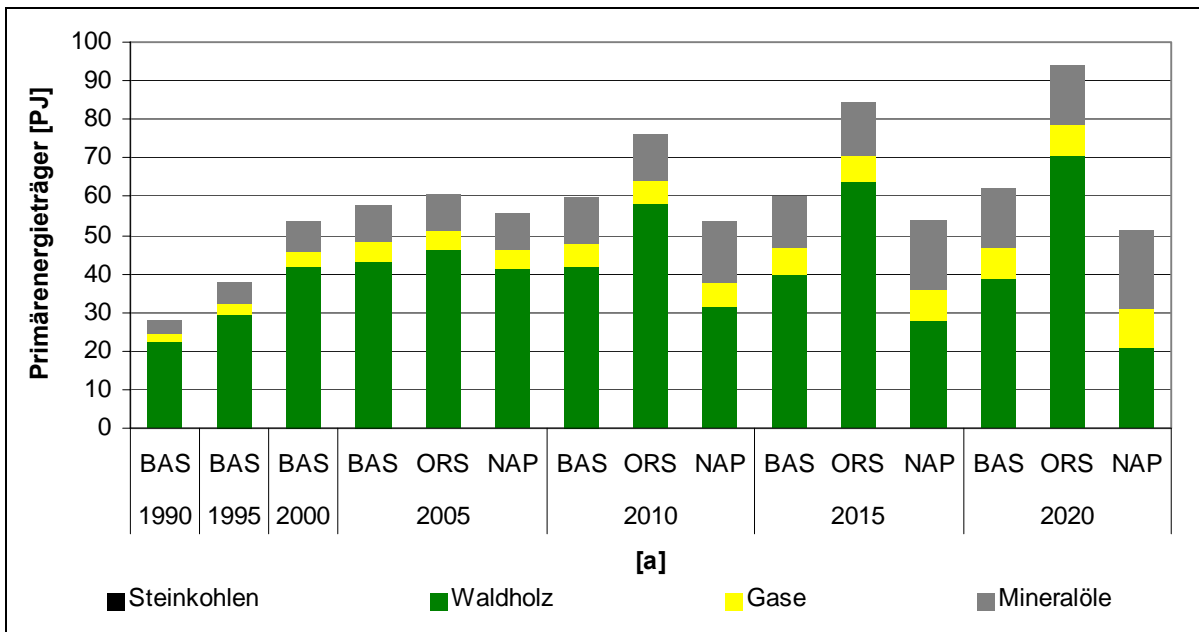


Abbildung 5-10: Entwicklung der Primärenergienachfrage nach Energieträgern

5.4.3 Verluste durch Umwandlung und Transport von Primär- zu Endenergieträgern

Der Vergleich von Primär- und Endenergieträgernachfrage zeigt, dass die prozentualen Verluste durch Umwandlung und Transport im Basisjahr bis zum Jahr 2020 im BAS und vor allem im NAP kontinuierlich reduziert werden können. Das ist im wesentlichen auf die effizientere Umwandlung von Holz in Holzkohle und dem höheren Anteil von Gas zurückzuführen.

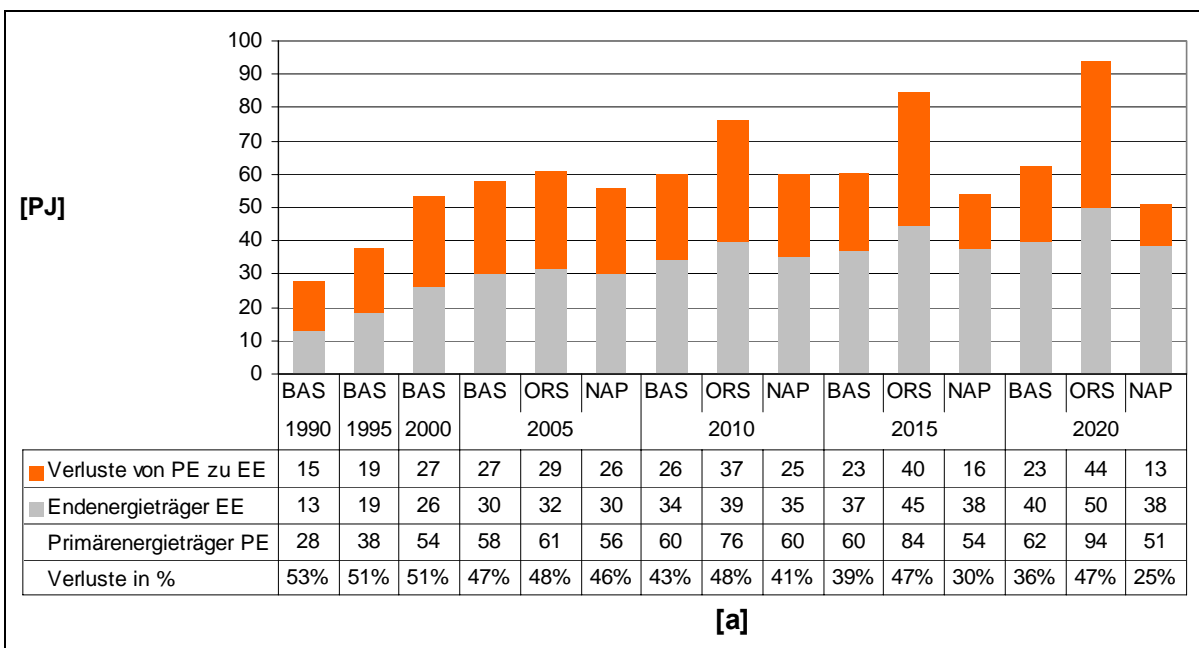


Abbildung 5-11: Verluste durch Umwandlung und Transport von Primär- zu Endenergieträgern

Im ORS werden die Marktanteile der effizienteren Technologien kaum erhöht, so dass auch im Jahr 2020 mit hohen Verlusten zu rechnen ist.

Aus diesem Vergleich kann geschlossen werden, dass ein Einsatz moderner Technologien, vor allem Meiler, sehr zu empfehlen ist. Aus energetischer Sicht ist ein Brennstofftausch von Holz zu Gas und Elektrizität empfehlenswert, wie die Ergebnisse aus dem NAP belegen. Betrachtet man die bereits im Basisjahr 1990 übernutzten Waldressourcen, ist ein Brennstofftausch ohnehin zu begrüßen, um die mögliche Devastierung der Flächen aufzuhalten.

5.4.4 Waldentwicklung und Holznutzung

Die Waldentwicklung wird durch die jährliche Holznutzung, die Waldbrände und die Brandrodung sowie den jährlichen Zuwachs maßgeblich bestimmt. Wenn der Holzvorrat im Wald abnimmt, sinkt der Energiespeicher der Wälder, wie in Abbildung 5-12 dargestellt ist.

Die Abbildung zeigt die Waldentwicklung in Form eines Balkendiagramms von 1990 bis 2020. Dargestellt sind die Veränderungen des Energiespeichers (Wald) im Abstand von fünf Jahren (sogenannte Stützjahre). Zudem sind die jährliche Nutzung, der jährliche Zuwachs und der jährliche Verlust als Verlauf über die Zeit dargestellt.

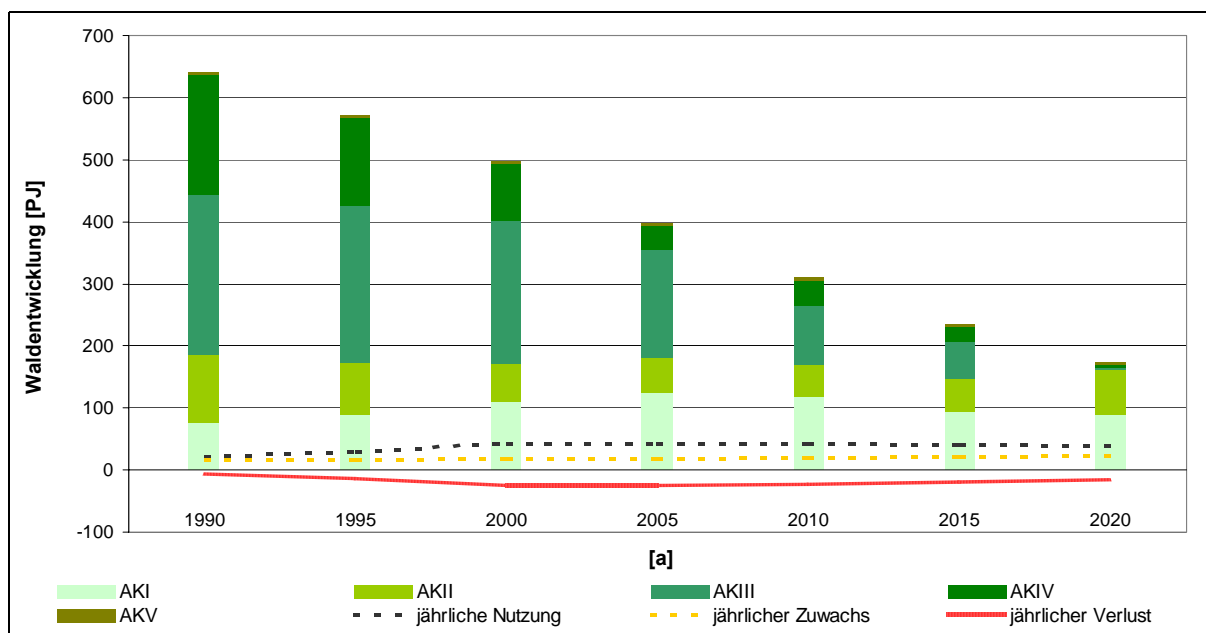


Abbildung 5-12: Waldentwicklung im BAS

Der Wald im BAS nimmt im 30-jährigen Modellierungszeitraum um insgesamt 73% beziehungsweise 467 PJ ab. Die Naturbestände der fünften Altersklasse (AKV) bleiben mit 3-4 PJ auf niedrigem Niveau, da sie per Definition keinen Nettozuwachs aufweisen und in den Szenarien auch nicht genutzt werden. Deutlich zu sehen ist die Abnahme der dritten und vierten Altersklasse, deren Energiespeicher im Jahr 2020 nur noch 4 und 3 PJ beträgt. Die erste Altersklasse (AKI) steigt hingegen in Folge der Flächenzunahme bis 2005 deutlich an. Ab 2008

sinken die Vorräte der AKI, da sie verstärkt in AKII übergehen. Das ist ein typisches Zeichen für übernutzte Wälder, wo die Holzvorräte abnehmen und sich die Flächen der Jungbestände ausdehnen.

Der jährliche Verlust des Waldes in Folge von Holznutzung und Waldbrand beträgt im Basisjahr 1990 rund 7 PJ. Eine nachhaltige Ressourcenentwicklung ist nicht gegeben.

Im ORS nimmt der Wald über den Modellierungszeitraum um 90% ab, so dass der Energiespeicher bis zum Jahr 2020 auf 61 PJ sinkt, wie in Abbildung 5-13 dargestellt ist.

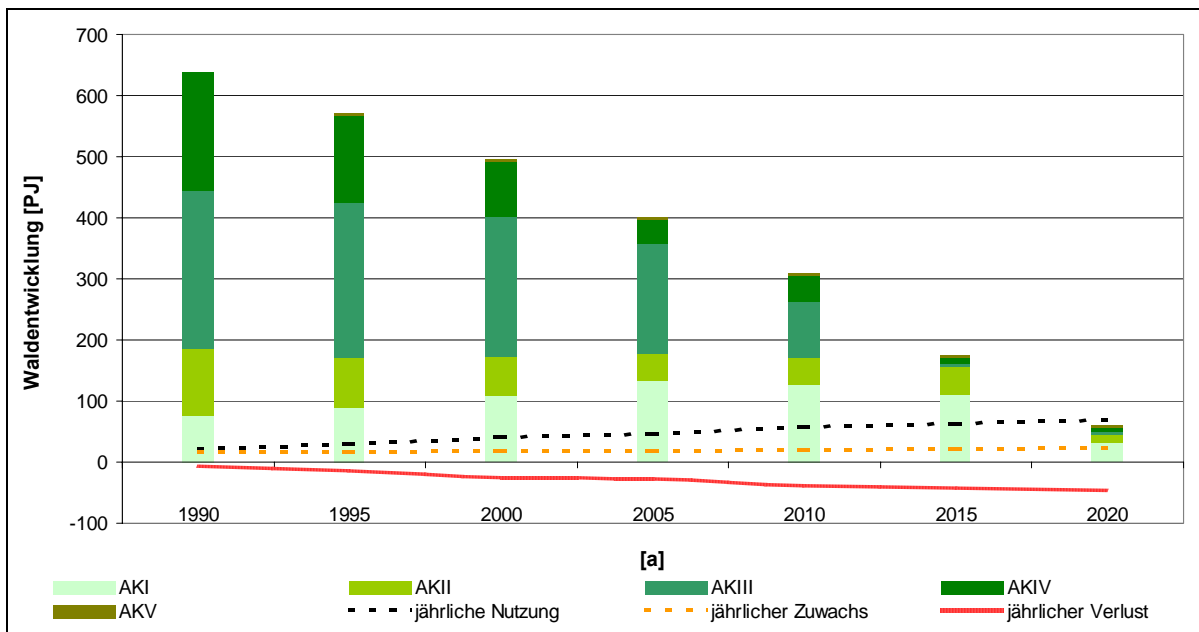


Abbildung 5-13: Waldentwicklung im ORS

Die Altersklassen AKII bis AKIV sind praktisch komplett abgeholzt, so dass nun verstärkt in die erste Altersklasse AKI eingegriffen wird, um den Holzbedarf zu decken. Das zeigt bereits im Jahr 2015 fatale Auswirkungen auf die weitere Holzversorgung. Die Bestände haben ab 2018 keine Chance mehr sich zu regenerieren, da selbst die Holzvorräte der AKI genutzt werden. Der Holzvorrat reicht im Jahr 2018 zur Deckung des Bedarfs nicht mehr aus. Das ORS verdeutlicht die dramatische Situation einer uneingeschränkten Holznutzung in Kombination mit den hohen Marktanteilen von traditionellen Meilern und Öfen. Aus nachhaltiger Sicht ist deshalb eine Entwicklung wie im ORS unbedingt zu vermeiden.

Im NAP sinkt der Energiespeicher des Waldes bis zum Jahr 2020 um 58% auf 266 PJ ab. Allerdings nimmt der Energiespeicher auf Grund der eingeführten Maßnahmen weit weniger dramatisch ab, als in den anderen Szenarien. Im Gegensatz zu den anderen Szenarien ist eine Trendwende möglich, da sich die Maßnahmen ab dem Jahr 2010 merklich auswirken.

Zu erkennen ist diese Trendwende am geringeren Nettoverlust durch die Holznutzung, der sich im Jahr 2020 gegen 0 nähert. Deshalb ist nur im NAP zu erwarten, dass der Wald nach 2020 wieder zunehmen kann.

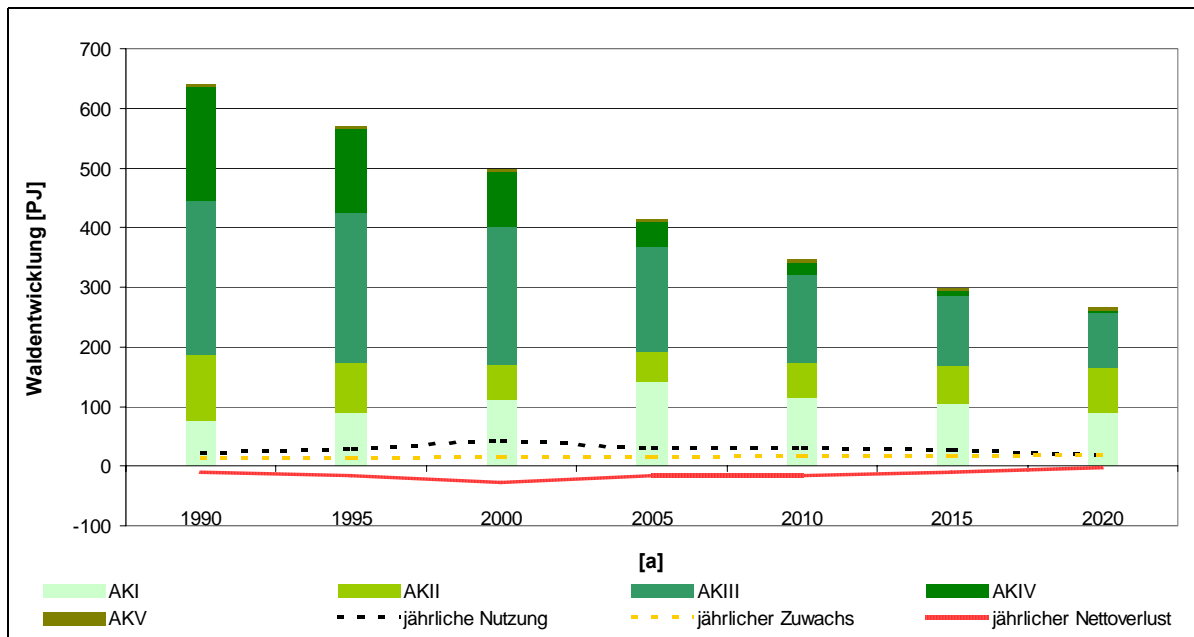


Abbildung 5-14: Waldentwicklung im NAP

Im BAS und vor allem im ORS ist damit zu rechnen, dass sich der Wald nicht mehr regenerieren kann und dass sich die gespeicherte Energie auf dem geringen Niveau von 2020 einpendelt. Aus Sicht der nachhaltigen Ressourcennutzung sind daher Maßnahmen notwendig, wie sie im NAP eingeführt wurden.

5.4.5 Entwicklung der Emissionen

Die Emissionen im Gesamtsystem setzen sich aus den Emissionen aus dem Wald, der Umwandlung und dem Transport vom Primärenergieträger (PE) zum Endenergieträger (EE) und der Umwandlung der Endenergieträger in Nutzenergie zusammen. Die Emissionen aus dem Wald werden durch Waldbrände, Brandrodung und bei Erosion freigesetzt. In Abbildung 5-15 sind die Emissionen gestapelt dargestellt, um die Gesamtentwicklung zu verdeutlichen. Die Entwicklung des Bodenspeichers des Waldes wird separat in Abbildung 5-16 erläutert, weil sie in der internationalen Klimaschutzdiskussion einen wichtigen Stellenwert einnimmt.

Die Emissionen steigen im BAS von 2,8 Mt CO₂eq im Jahr 1990 auf rund 5,2 Mt im Jahr 2005 an und sinken danach in Folge der verbesserten Technologien auf 4,9 Mt CO₂eq. Im NAP sind bereits ab 2005 weniger Emissionen zu erwarten als im Jahr 2000 und diese fallen bis zum Jahr 2020 auf rund 4 Mt. Erwartungsgemäß steigen die Emissionen im ORS stark auf rund 7,4 Mt CO₂eq im Jahr 2020 an.

Gemäß der Modellrechnung beträgt der Anteil der Waldbrände an den Emissionen im BAS im Jahr 1990 rund 26% und sinkt auf 8% im Jahr 2020. Allerdings steigen die Emissionen durch Umsetzungsprozesse im Boden von 1990 bis 2020 um nahezu 100%. Im Jahr 1990 emit-

tiert der Boden rund 0,1 Mt CO₂eq und hat einen Anteil von 3,5% an den Gesamtemissionen. Im Jahr 2020 emittiert der Boden rund 0,2 Mt CO₂eq. Das entspricht einem Anteil von 3,3% der Gesamtemissionen.

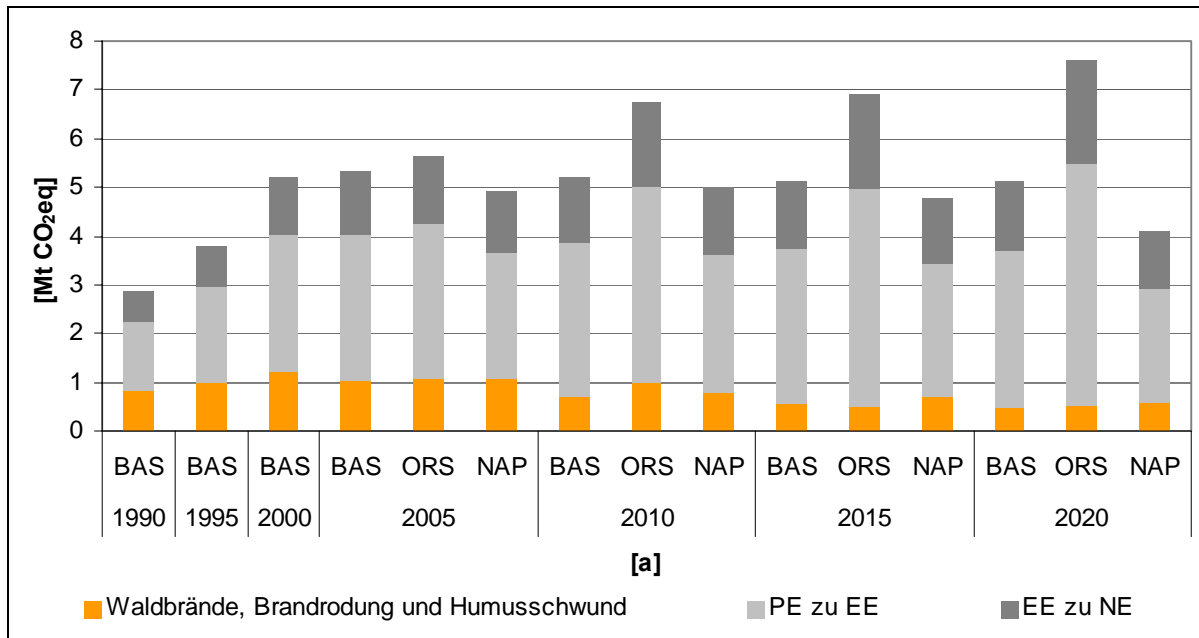


Abbildung 5-15: Emissionen aus dem Gesamtsystem (Energie- und Waldsystem)

Zwar zeigen die Böden durch die Übernutzung hohe Abbauraten. Gleichzeitig binden jedoch einige der nachwachsenden Baumarten das 2,5-fache an N₂O /Chidumayo, 1997/ im Vergleich zu anderen Baumarten. Es wird angenommen, dass Teile des Kohlenstoffgehalts im Boden als CO₂ emittiert werden.

Im ORS steigen die Emissionen auf rund 7,6 Mt CO₂eq im Jahr 2020 an. Veraltete Technologien führen zu kontinuierlich steigenden Emissionen aus den Energiesektoren. Aus ihnen werden im Jahr 2020 knapp 7 Mt CO₂eq freigesetzt.

Über den Boden gelangen gegenüber dem BAS zusätzlich etwa 17% CO₂eq in Folge der Umsetzung beziehungsweise der Vernichtung von Bodenhumus in die Atmosphäre. Auf der anderen Seite sind die Emissionen im ORS durch Waldbrände niedriger, weil durch die Übernutzung weniger Biomasse vernichtet werden kann.

Im NAP steigen die Emissionen bis zum Jahr 2010 auf 5 Mt CO₂eq an. Danach nehmen sie wieder ab und erreichen im Jahr 2020 rund 4,1 Mt CO₂eq. Das liegt am Maßnahmenmix in diesem Szenario. Die Emissionen durch Waldbrände sind höher als in den anderen Szenarien, weil mehr Wald dem Feuer zum Opfer fällt. Die Emissionen aus dem Waldsystem liegen im Jahr 2020 mit 0,6 Mt CO₂eq geringfügig höher als bei den anderen Szenarien.

Durch die Reduktion liegen die gesamten Emissionen im NAP allerdings um 46% unter dem ORS und um 20% unterhalb des BAS. Damit sind die Maßnahmen im NAP auch hinsichtlich der Auswirkungen auf die Emissionen zu empfehlen.

Die Entwicklung des Kohlenstoffgehalts im Boden wird anhand von Abbildung 5-16 erläutert. Auf Grund der Vergleichbarkeit mit den Emissionen wird der Kohlenstoffgehalt im Boden in Mt CO₂eq angegeben. Die Abnahme des Kohlenstoffgehalts im Boden ist trotz der Bestandesabnahmen relativ gering, da bei der Holzernte nur selten Flächen von mehr als 1 km² abgeholzt werden. Außerdem bleiben vielfach Gebüsch und andere Gehölze stehen, die sich nicht für die Verkohlung oder zur direkten Verbrennung eignen. Des weiteren bleiben einige Bäume stehen, die aufgrund ihrer niedrigen Dichte ebenfalls nicht zur Holzkohleherstellung geeignet sind. Auf Grund dieser Umstände ist eine großflächige Erosion gebannt. Der Bodenabtrag durch Wind- und Wassererosion ist daher geringer als bei flächigem Kahlschlag.

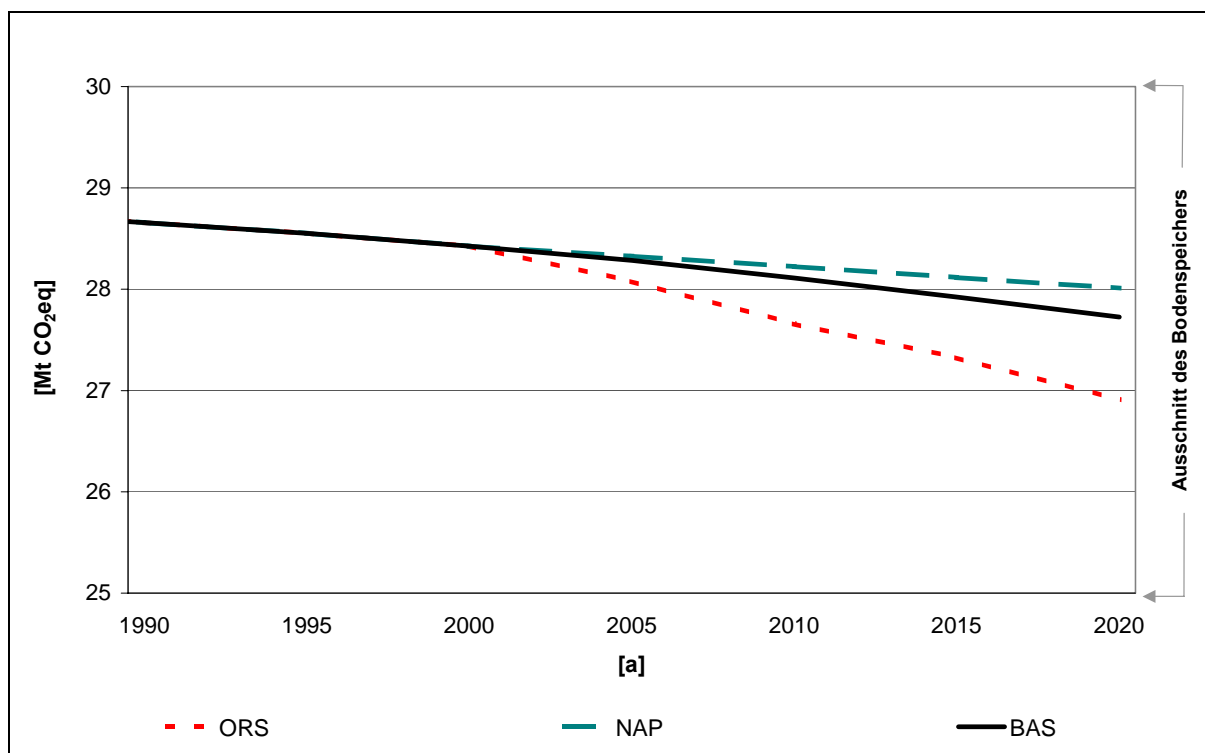


Abbildung 5-16: Kohlenstoffgehalt im Boden des Untersuchungsgebietes

Der Kohlenstoffgehalt im Boden sinkt im ORS von rund 28,7 Mt CO₂eq im Jahr 1990 auf gut 26,9 Mt CO₂eq im Jahr 2020. Das entspricht einem jährlichen Nettohumusabbau von etwa 0,2% in der Modellierungszeit. Im BAS ist ein jährlicher Humusabbau von 0,11% pro Jahr zu beobachten, während im NAP ein jährlicher Humusabbau von 0,08% zu erkennen ist. Eine Zunahme des Kohlenstoffgehalts im Boden konnte in keinem Szenario beobachtet werden.

5.4.6 Baselinebetrachtung

Die nachfolgende Baselinebetrachtung beginnt im Jahr 2000, das als Basisjahr (Vergleichsjahr) für Entwicklungsländer vorgesehen ist. Um die prozentuale Veränderung der Emissionen zu beurteilen, sind in Abbildung 5-17 das ORS und das NAP gegenüber dem BAS aufgezeichnet.

In diesem Vergleich werden auch die jährlichen C-Speicher bilanziert, indem die Nettozuwächse an Holz in CO₂eq umgerechnet werden. Durch diese Vorgehensweise kann gezeigt werden, wie sich die CO₂eq-Bilanz mit steigenden C-Speichern im Wald entwickelt. Nimmt der Holzvorrat des Waldes einer Region wieder zu, kann ab diesem Zeitpunkt von einem CO₂-neutralen Brennstoff gesprochen werden, da mehr Kohlenstoff im Wald gebunden als CO₂eq über Verbrennungsprozesse freigesetzt wird. Dann besteht die Möglichkeit, dass sich der Wald in menschlichen Zeiträumen regeneriert und den „Turn-Around“ schafft. Er verringert in diesem Fall die CO₂eq-Bilanz im Gesamtsystem. Wie gezeigt wurde, ist dies allerdings höchstens im NAP zu erwarten.

Im BAS sinken die Emissionen bereits im Jahr 2015 unter das Niveau von 2000, wie in Abbildung 5-17 gezeigt ist.

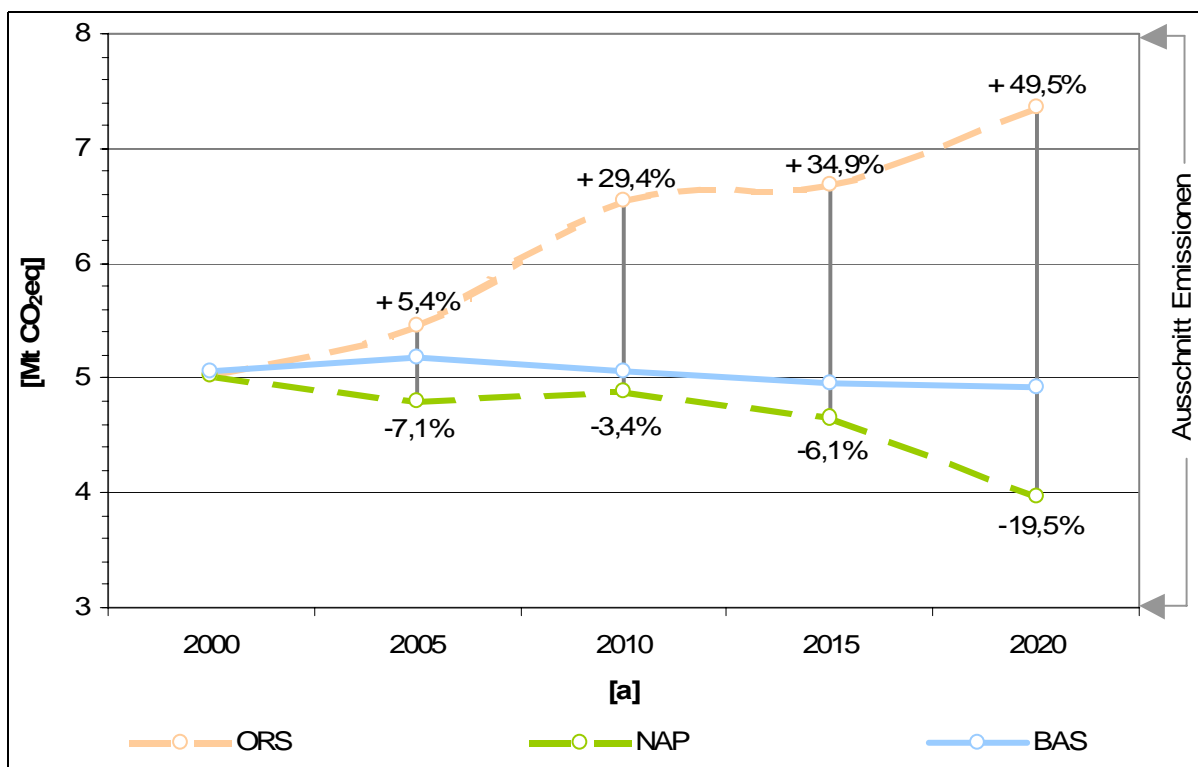


Abbildung 5-17: Entwicklung der Emissionen in den Szenarien mit Referenztrend

Die verbesserten Technologien zeigen ihre Wirkungen bereits im BAS. Es ist davon auszugehen, dass es sich um keine zusätzlichen Maßnahmen im Klimaschutz handelt, sondern diese ohnehin durchgeführt werden. Insofern könnte das vorliegende BAS als plausible Baseline im betrachteten Gesamtsystem erwogen werden. Einzelne CDM-Projekte können mit ihren Auswirkungen auf die Emissionen im Gesamtsystem analysiert und quantifiziert werden. Auf Grund der Verkettung der Prozesse sollten die Emissionsminderungen aus einzelnen CDM-Projekten jedoch über das Gesamtsystem bilanziert werden. Die Minderung ist die Differenz zum BAS.

Diese Betrachtung ist auch für die anderen Szenarien möglich. So steigen die Emissionen

im ORS gegenüber dem BAS ab dem Jahr 2005 drastisch an und liegen im Jahr 2020 um die Hälfte höher.

Das NAP zeigt die zusätzlichen möglichen Emissionsminderungen gegenüber dem BAS. Bis zum Jahr 2015 reduzieren sie sich geringfügig. Ab 2015 machen sich jedoch die Maßnahmen deutlich bemerkbar und es kommt im Jahr 2020 zur einer Reduktion gegenüber dem BAS von 19,5%. Vergleicht man die Ergebnisse mit dem Jahr 1990 so liegen auch im NAP die Emissionen im Jahr 2020 um rund 30% höher.

Die Ergebnisse bedeuten, dass sich die Emissionen auch unter günstigen Bedingungen in der Modellierungszeit nicht unter das Niveau von 1990 reduzieren lassen. Allerdings deuten die Ergebnisse darauf hin, dass bei einem zugrundeliegenden Basisjahr (Vergleichsjahr) 2000 faire Ausgangsbedingungen für Entwicklungsländer bestehen. Die Einführung entsprechender Maßnahmen wie im BAS oder vor allem wie im NAP führt zu langfristig sinkenden Emissionen.

5.4.7 Sensitivitätsanalyse zum Einfluss des Bevölkerungswachstums auf die Emissionen

Um den Einfluss des Bevölkerungswachstums auf die Entwicklung der Emissionen im Untersuchungsgebiet zu bestimmen, wurde eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Die Szenarien wurden mit jedem Bevölkerungswachstum aus Tabelle 5-1 berechnet. Hierdurch ergeben sich auch die oberen und unteren Extreme in der Modellierungszeit für das Basisszenario (BAS), das Szenario ohne Ressourcenschutz (ORS) und das Szenario mit nachhaltiger Energie- und Forstwirtschaft (nationalem Aktionsplan) (NAP). Die Abkürzungen M, H, und T haben nachfolgende Bedeutung:

- -M Moderates Bevölkerungswachstum
- -H Hohes Bevölkerungswachstum
- -T Tiefes Bevölkerungswachstum

Die Emissionen des jeweils gleichen Szenarios sind umso niedriger, je geringer der Bevölkerungsanstieg ist, wie in Abbildung 5-18 dargestellt ist. Allerdings müssen die Emissionen zwischen den Szenarien näher betrachtet werden, da es einige Überschneidungen gibt. In den Basisszenarien kann ab dem Jahr 2010 von tendenziell parallel verlaufenden Emissionen ausgegangen werden. Die Emissionen im BAS-M sinken ab 2001 auf Grund der nun wirksamen Maßnahmen marginal ab. Im BAS-T sinken die Emissionen zwischen 2005 und 2010 um knapp 11%. Der Bevölkerungsanstieg macht sich bis zum Jahr 2005 im BAS-H deutlich bemerkbar. Die Emissionen liegen bis zum Jahr 2007 über denen des ORS-M. Lediglich die Emissionen im ORS-H liegen um 7% über dem BAS-H. Im Jahr 2007 schneiden sich die Emissionen im BAS-H mit den Emissionen im ORS-M. An dieser Stelle kann gezeigt werden, dass das Bevölkerungswachstum zwar der wesentliche Einflussfaktor ist, dass aber mit Maßnahmen in der Energie- und Forstwirtschaft auch bei starkem Bevölkerungsanstieg die Emissionen re-

duziert werden können. Hingegen führen versäumte Maßnahmen (vor allem keine moderne Technologien) selbst bei moderatem Bevölkerungsanstieg zu weiter ansteigenden Emissionen. Selbst die Emissionen im ORS-T schneiden sich im Jahr 2013 mit dem BAS-H und steigen weitgehend linear weiter.

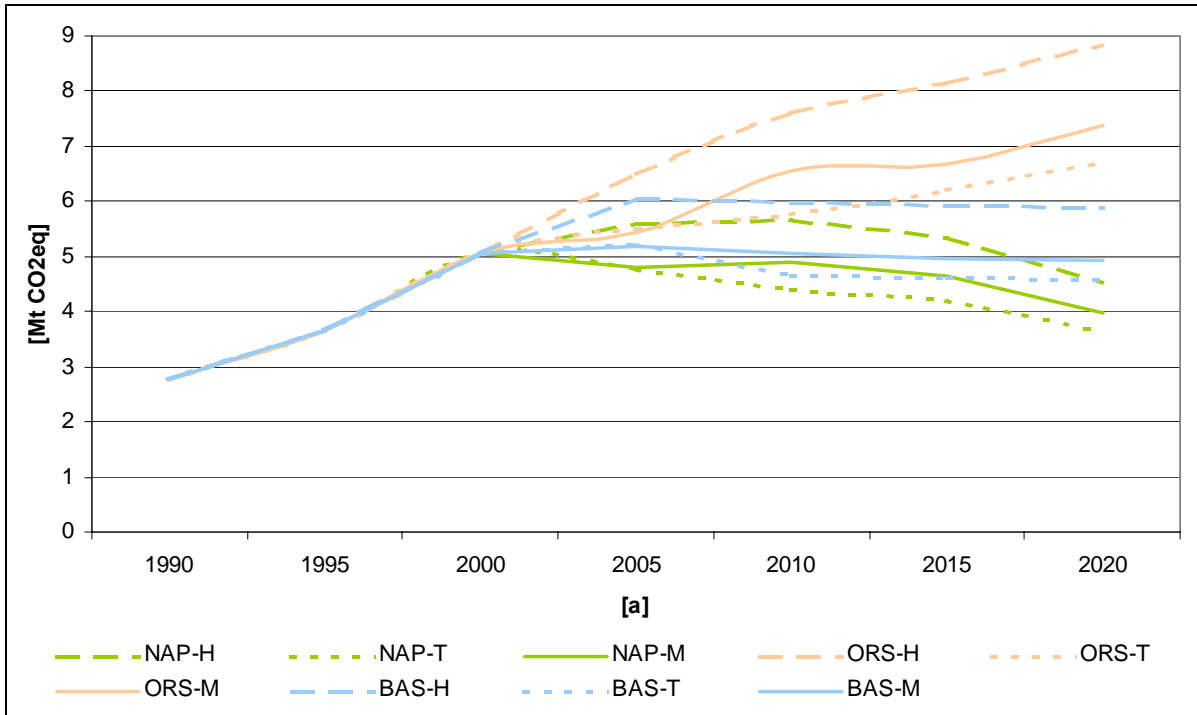


Abbildung 5-18: Entwicklung der Emissionen mit unterschiedlichem Bevölkerungswachstum

Alle drei Szenarien ohne Ressourcenschutz (ORS) zeigen, dass tendenziell steigende Emissionen in der Modellierungszeit zu erwarten sind. Im ORS-T steigen die Emissionen bis zum Jahr 2020 um mehr als das 1,4-fache im Vergleich zu 1990 an. Die Emissionen im ORS-M steigen zwischen 2010 und 2015 nur unwesentlich, weil die geringfügige Erhöhung der Marktanteile von verbesserten Holzkohleöfen greifen.

Hingegen sinken die Emissionen im NAP-H trotz höherem Energiebedarf und gestiegenem Lebensstandard nur um rund 11% gegenüber dem Jahr 2000 und liegen um rund 64% höher als 1990. Ab dem Jahr 2010 nehmen die Emissionen in allen NAP ab und liegen im Jahr 2020 selbst im Hochtrend deutlich unter dem Niveau des Jahres 2010.

Aus dem Vergleich der neun Entwicklungen kann einerseits geschlossen werden, dass das Bevölkerungswachstum dominierende Einflüsse auf die Emissionen hat. Ungebremstes Bevölkerungswachstum führt zu höheren Emissionen, gerade wenn keine flankierenden Maßnahmen zur verbesserten Energieversorgung durchgeführt werden. Andererseits lassen sich durch Maßnahmenbündel selbst bei starkem Bevölkerungsanstieg die Emissionen wirksam reduzieren.

Das heißt, dass neben der Kontrolle des Bevölkerungsanstiegs, die Einführung moderner

Kraftwerke, verbesserter Technologien im Energiesystem und bei der Holznutzung sowie eine nachhaltige Forstwirtschaft mit Feuerkontrolle sehr wichtig sind, um die Emissionen zu senken.

5.5 Vergleich der Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Fallstudie miteinander und mit anderen Studien in Tansania verglichen. Jedes Szenario wurde mit drei möglichen Bevölkerungsentwicklungen kombiniert und berechnet, wodurch sich insgesamt neun Fälle unterscheiden lassen.

Die Ergebnisse zeigen, dass im Szenario ohne Ressourcenschutz die höchsten Emissionen erwartet werden können. Im Basisszenario steigen die Emissionen erwartungsgemäß mit zunehmender Bevölkerung an. Im Szenario mit nachhaltiger Energie- und Forstwirtschaft hingegen können sie ab dem Jahr 2010 reduziert werden. Im günstigsten Fall liegen sie im Jahr 2020 um 31% über dem Niveau von 1990. Im ungünstigsten Fall steigen die Emissionen bis zum Jahr 2020 um das 1,4-fache gegenüber 1990 an.

Trotz höherem Endenergieträgerverbrauch bis 2020 lässt sich im NAP eine Abnahme der Emissionen zeigen. Dies ist vor allem den verbesserten Technologien und zusätzlich der Einführung moderner Kraftwerke zu verdanken. Diese versorgen die Haushalte ab 2010 mit elektrischer Energie. Zudem wird in den NAP-Szenarien Dar es Salaam im Jahr 2005 an eine Gasleitung angeschlossen, wodurch sich weitere CO₂-Einspareffekte in den Dienstleistungs-, Gewerbe- und Industriesektoren ergeben

In allen Szenarien nehmen die Waldfläche und die Bestände im Untersuchungsgebiet ab. Durch eine verstärkte Nutzung von Gas und Wasserkraft, vor allem aber verbesserten Meilern und Öfen im Energiesystem sowie durch Feuerkontrollen kann der Wald deutlich geschont werden. Der anhaltende Waldverlust kann nur im NAP vermieden werden. Die Maßnahmen für eine nachhaltige Erholung des Waldes sind ausreichend, weil sich der Wald im NAP regeneriert und gleichzeitig den Holzbedarf decken kann. Zudem wächst der Wald schneller nach, als von /Frey, Neubauer, 2002/ gezeigt werden konnte. Das liegt daran, dass sich der Wald im Untersuchungsgebiet weiter verjüngt. Da die Wachstumsraten von jungen Beständen die der alten übertreffen, ist der jährliche Zuwachs auf den Flächen größer als von /Frey, Neubauer, 2002/ unterstellt. Vergleicht man die Wachstumsraten mit der Studie von /Malimbwi et al., 2001/, so zeigt sich, dass der jährliche Zuwachs mit zunehmender Verjüngung der Bestände im oberen Bereich der Schätzungen von /Malimbwi et al., 2001/ (0,5 bis 7,4 t/ha a) liegen. Die unterschiedlichen Wachstumsraten ergeben sich aus den unterschiedlichen Höhenlagen und Standortverhältnissen.

Die Ergebnisse der vorliegenden Fallstudie sind ein Hinweis darauf, dass der jährliche Zuwachs in der Untersuchungsregion aufgrund der Dynamik von jungen Beständen wesentlich unterschätzt wurde. Vergleicht man den Basisfall von /Frey, Neubauer, 2002/ mit dem BAS, dann wird ersichtlich, dass auf Grund der Wachstumsdynamik junger Bestände in übernutzten

Gebieten nicht mit durchschnittlichen Wachstumsraten gerechnet werden kann. Durch die Berücksichtigung des Alters und der Zeit in Form von Altersklassen ergibt sich ein Waldbestand dessen Holzzuwächse um etwa 10% höher sind als bei /Frey, Neubauer, 2002/. Der Holzvorrat nimmt, wie er im BAS modelliert wurde, in der Untersuchungsregion von 1990 bis 2020 um rund 73% ab. Die Rahmenbedingungen der beiden Studien im Basisszenario unterscheiden sich zwar geringfügig hinsichtlich des Bevölkerungswachstums und dem Einsatz neuer Technologien, sie sind jedoch größenordnungsmäßig miteinander vergleichbar.

Die Fallstudie bestätigt die enge Verknüpfung von Energie- und Forstwirtschaft in Entwicklungsländern. Einzelne Maßnahmen in der Forstwirtschaft beeinflussen unmittelbar die Kohlenstoffbilanz im Gesamtsystem. Auf Grund der Verkettung der Prozesse im Energie- und Waldsystem dürfen sie jedoch nicht unmittelbar summiert werden, da eine Addition einzelner Maßnahmen zu hohen Emissionsreduzierungen führen würden, die in der Realität nicht existieren. Die Ergebnisse der Fallstudie zeigen, dass Feuer und Erosion eine geringe mittelfristige Bedeutung für die Regeneration von Waldbeständen im tansanischen Untersuchungsgebiet haben. Es sind zusätzliche fossile Energieträger oder Eingriffe in bislang unberührte Waldökosysteme erforderlich, um den Energiebedarf zu decken.

Unsicherheiten hinsichtlich der Berechnung der Emissionen

Mit den Unsicherheiten bezüglich der Messung und Berechnung der Emissionen beschäftigt sich beispielsweise die Sachverständigenkommission des IPCC. Die Richtlinien zur Erstellung von Emissionsinventaren werden regelmäßig überarbeitet und weiterentwickelt. Allerdings weisen die Emissionsinventare des IPCC beträchtliche Unsicherheiten auf. Laut /Winiwarter, Rypdal, 2001/ liegen die Unsicherheiten bei 30% für CH₄ und bei 50% für N₂O. Für CO₂ muss von einer Unsicherheit von rund 10% ausgegangen werden.

Die Bodenprozesse sind in vielen Entwicklungsländern noch wenig erforscht, worauf beispielsweise /Veldkamp, 2001/ hinweist. Dies trifft auch auf das Untersuchungsgebiet zu. Zwar kann der Humusgehalt in den einzelnen Bodenschichten relativ genau bestimmt werden /Chidumayo, 2001/, doch fehlen langjährige Vergleiche und Messungen, wie sich die Emissionen unter verschiedenen Nutzungen entwickeln. Da die Temperaturschwankungen in subtropischen und tropischen Gebieten einer Höhenlage jedoch im Vergleich zu anderen Klimazonen der Erde gering sind, ist zu vermuten, dass Messungen über ein Jahrzehnt zuverlässige und repräsentative Ergebnisse bringen würden.

In Waldböden wird organisches Material unter anaeroben Bedingungen abgebaut, so dass CH₄-Emissionen freigesetzt werden. Allerdings tragen die Böden gemäß den Modellrechnungen absolut gesehen nur geringfügig zu den Emissionen bei, so dass die CH₄-Emissionen im Modell keine entscheidende Relevanz einnehmen. Mikrobielle Umsetzungen von Stickstoffverbindungen in den Böden, die sowohl natürlichen als auch anthropogenen Ursprungs sein können, sind global die wichtigsten Quellen für N₂O /Öko Institut, 2003/. Stickstoffverbindun-

gen werden in Böden direkt oder auch über den Wasser- und Luftpfad eingetragen. Die Freisetzung von N₂O (hauptsächlich über den Abbau von Nitrat) ist sehr dynamisch und divergiert sehr stark. Aus diesen Gründen bestehen hier die größten Unsicherheiten. Im Modell wurde gemäß Untersuchungen von /Chidumayo, 1997/ angenommen, dass in Miombo-Beständen im Vergleich zu anderen Beständen das 2,5-fache an N₂O über die Wurzeln gebunden werden kann. Laut Modellrechnung heben sich die N₂O-Emissionen und -Bindungen mehr oder weniger auf.

Hingegen beeinflusst insbesondere Feuer die CO₂eq-Bilanz erheblich. Etwa 45% der pflanzlichen Biomasse besteht aus Kohlenstoff, der bei Verbrennung mit Sauerstoff oxidiert und als CO₂ emittiert wird. Bei der Pyrolyse und unvollständigen Verbrennung - wie es bei Waldbränden vorkommt - werden auch Nährelemente wie Stickstoff in verschiedene gasförmige Verbindungen umgewandelt. Es entstehen neben CO vor allem CH₄ sowie eine Reihe anderer Kohlenwasserstoffe. Der Anteil von Stickstoff wird in der Literatur mit 0,3% bis 3,8% angegeben /Goldammer, 1993/. In der vorliegenden Fallstudie wurde wegen der hohen N-Bindungsraten der Miombo-Bestände mit dem oberen Wert gerechnet. Da jedoch bei der Verbrennung neben N₂O auch andere Stickstoffverbindungen entstehen, wurde unterstellt, dass nur 10% des Stickstoffs als N₂O freigesetzt werden.

Diese Unsicherheiten spielen im Energiemodell eine vergleichsweise untergeordnete Rolle, da vor allen CO₂ emittiert wird. Die Emissionsfaktoren von CO₂ lassen sich bei Verbrennungsprozessen anhand des Kohlenstoffgehalts des Brennstoffs und über Daten und Informationen zur Verbrennungstechnik genau ermitteln.

Würde man die Systemgrenzen des Modells erweitern, müssten neben der Verteilung von Erdgas auch die CH₄-Emissionen aus der Erdgas-Förderung des Songo-Songo-Projekts miteinbezogen werden. Hierdurch würden sich die CH₄-Emissionen merklich erhöhen.

N₂O wird hauptsächlich von der Industrie bei der Adipinsäureherstellung (Adipinsäure ist der Grundstoff bei der Kunststoffherstellung, Lösemittel, Weichmacher) und in geringerem Umfang durch den Verkehr bei der katalytischen Reinigung von Kraftfahrzeugabgasen emittiert /Öko Institut, 2003/. Die Adipinsäureherstellung spielt in Tansania keine Rolle. Der Verkehr wurde ebenfalls nicht in die Fallstudie mit einbezogen.

Die Ergebnisse der Fallstudie lassen die folgenden wesentlichen Schlussfolgerungen zu:

- Das Bevölkerungswachstum hat den dominierenden Einfluss auf die Emissionen. Ungebremstes Bevölkerungswachstum führt zu höheren Emissionen, gerade wenn keine flankierenden Maßnahmen in der Energie- und Forstwirtschaft durchgeführt werden, welche die Energieversorgung verbessern.
- Durch Maßnahmenbündel lassen sich selbst bei starkem Bevölkerungsanstieg die Emissionen wirksam reduzieren. Dazu gehören die Einführung moderner Kraftwerke, verbesserte Technologien im Energiesystem und bei der Holznutzung sowie eine nachhaltige Forstwirtschaft mit Feuerkontrolle

- Böden haben einen geringen Einfluss auf die CO₂eq-Bilanz der Untersuchungsregion. Selbst im ORS sinkt der Bodenspeicher um durchschnittlich 0,2% jährlich. Sein Anteil an den Gesamtemissionen durch Umsetzungsprozesse liegt auch im Jahr 2020 unter 3,5%.
- Die Einführung eines Nationalen Energieplans ist für Tansania zu empfehlen, weil sich hierdurch die Emissionen und der Energieträgereinsatz wesentlich reduzieren lassen und die Waldessourcen geschont werden können.
- Aus Sicht des Ressourcenschutzes ist zudem eine Umstellung auf Gas und Elektrizität in den Haushalten vorteilhaft, wodurch die Waldvernichtung stark gemindert und gestoppt werden kann.

6 Schlussbetrachtung

In diesem Kapitel werden die integrierte Analyse von Energie- und Waldsystemen, die Möglichkeiten für den Einsatz des Modells sowie die Ergebnisse der Fallstudie zusammengefasst. In einem Ausblick wird die Arbeit in einen größeren thematischen Zusammenhang gestellt und es werden weitere Forschungsmöglichkeiten abgeleitet. Die Ausführungen orientieren sich an Abbildung 6-1.¹

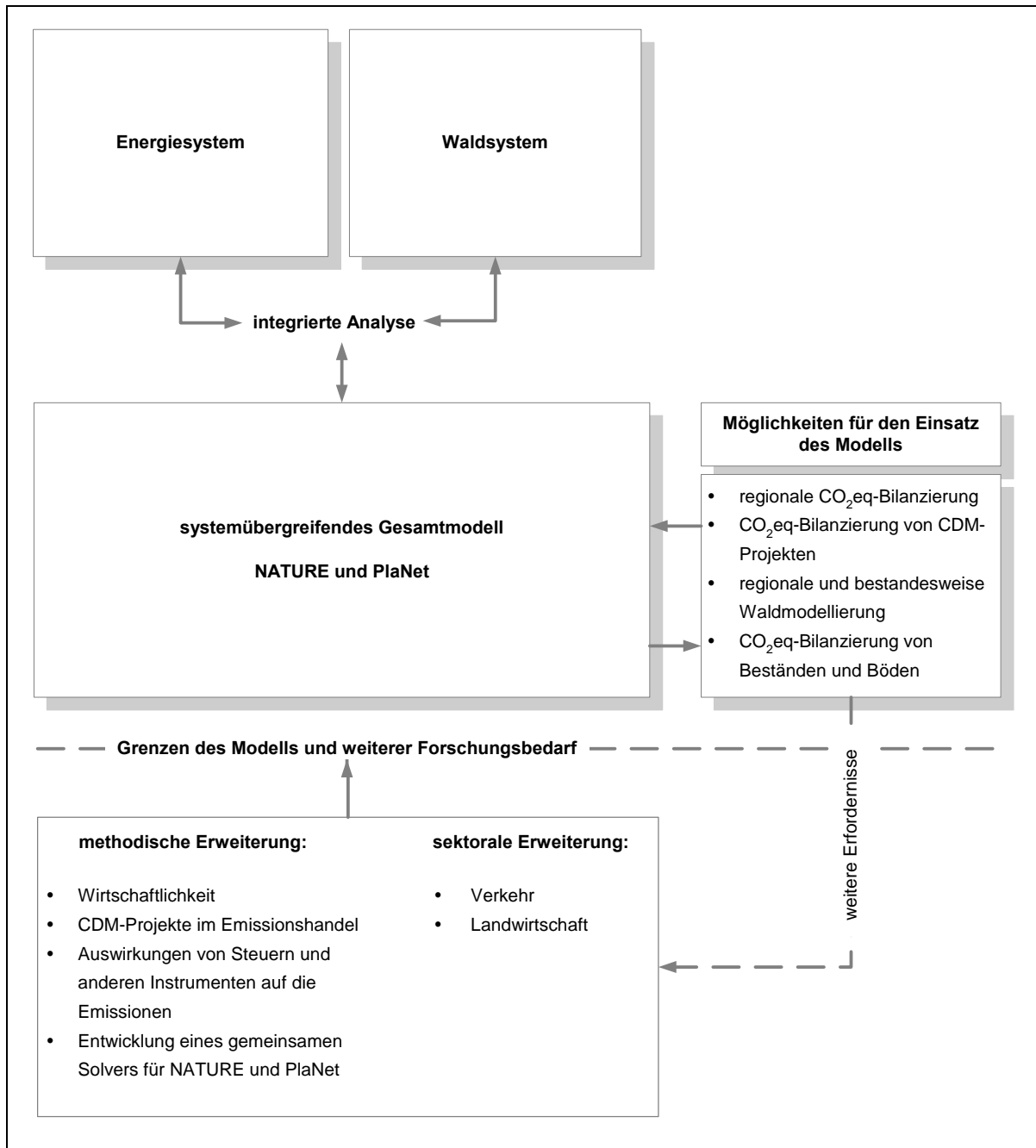


Abbildung 6-1: Möglichkeiten, Grenzen und Erweiterung des Modells

¹ CO₂eq steht für CO₂-Äquivalente, die sich aus CO₂, N₂O und CH₄ zusammensetzen

6.1 Zusammenfassung

Die Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und das Kioto-Protokoll bilden den gesellschafts- und umweltpolitischen Hintergrund dieser Arbeit. Da der Beitrag von Entwicklungsländern zur Treibhausgasreduktion äußerst kontrovers diskutiert wird, ergeben sich mannigfache wissenschaftliche Fragen.

Ziel war es, die Wechselwirkungen von Energie- und Waldsystemen in Entwicklungsländern besser zu verstehen und die Energie- und CO₂eq-Bilanz unter verschiedenen Rahmenbedingungen zu modellieren.

Das Planungsinstrument MESAP (Modulare Energie System Analyse und Planung) wurde gewählt, um die wechselseitigen Beeinflussungen modellieren zu können. Für die Simulation des Energiesystems konnte auf das gängige mathematische Simulationsinstrument PlaNet zurückgegriffen werden, das standardmäßig in MESAP integriert ist. Da MESAP das RES (Referenzenergiesystem) vor allem zur vereinfachten Abbildung von Energiesystemen einsetzt, wurden Möglichkeiten gesucht, wie sich auch Waldsysteme im RES abbilden lassen. Es zeigte sich, dass das RES alleine nicht ausreicht, um die dynamischen Verhältnisse von Wald- und Bodenentwicklungen hinreichend genau abzubilden. Durch eine Integration von zellulären Automaten in das RES konnten schließlich dynamische Waldentwicklungen zur Kohlenstoffbilanzierung mit einer hohen Abbildungsgenauigkeit realisiert werden. Sie wurden neu als zelluläre Güter definiert. Die zellulären Güter richten sich zur Berechnung nach den Modellperioden mit ihren zeitlichen Abständen. Zur Berechnung der zellulären Güter wurde das mathematische Simulationsinstrument NATURE entwickelt. Es ist in der Lage, Flächen- und Volumenänderungen von Wald- und Bodensystemen mit ihren bestimmenden Einflussfaktoren auf die CO₂eq-Bilanz zu berechnen. Die Lösung der Gleichungssysteme erfolgt in drei Stufen, um die Wechselwirkungen des Energie- und Waldsystems zu berücksichtigen. Zunächst werden die Gleichungssysteme von zellulären Gütern und dem RES erstellt. Danach wird das Gleichungssystem der zellulären Güter mit NATURE und anschließend das gesamte RES mit PlaNet berechnet. Das Lösen erfolgt für jede Modellperiode; die Ergebnisvariablen werden über eine Schleife als Eingangsvariablen in die nächste Modellperiode geschrieben. Dieser Vorgang wurde in der Arbeit als evolutionäres Lösen bezeichnet. Mit der integrierten Analyse von NATURE und PlaNet ergeben sich folgende Möglichkeiten für den Einsatz des Modells:

- regionale Energie- und CO₂eq-Bilanzierung im Gesamtsystem sowie im Energie- und Waldsystem unter verschiedenen Rahmenbedingungen
- CO₂eq-Bilanzierung von CDM-Projekten. Dazu gehören beispielsweise die Auswirkungen eines veränderten Energiemixes oder von Aufforstungen auf die CO₂eq-Bilanz
- regionale und bestandesweise Waldmodellierung
- Veränderung der CO₂eq-Bilanz in Abhängigkeit von Bestandes- und Bodentypen

Um die praktische Anwendung der Methode zu prüfen, wurde im Rahmen einer Fallstudie für Dar es Salaam, Tansania auf der Basis der drei Szenarien aus Abbildung 5-2 auf Seite 81 eine Energie- und CO₂eq-Bilanzierung durchgeführt.

Die Szenarien wurden mit dem moderaten Bevölkerungswachstum Tabelle 5-1 auf Seite 76 berechnet. Das Bevölkerungswachstum übt als exogener Parameter den größten Einfluss auf den künftigen Haushaltsenergiebedarf und die Emissionen aus. Für die Industrie und das Gewerbe ist das Bruttoinlandsprodukt die treibende exogene Größe im Modell. Um den Einfluss des Bevölkerungswachstums auf die Ergebnisse zu zeigen, wurden die Szenarien im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse mit jeweils drei verschiedenen Bevölkerungswachstumsraten kombiniert und berechnet. Dadurch entstanden neun Fälle.

Aus den Ergebnissen der Arbeit lassen sich die folgenden Schlussfolgerungen ableiten:

- das Modell kann als Monitoring-System für CDM-Projekte genutzt werden. Es kann Auswirkungen von Maßnahmen auf die CO₂eq-Bilanz in Gesamtsystemen quantifizieren
- Prozesse in Energie- und Forstwirtschaft sind verkettet, da beispielsweise intensive Holznutzung die Waldverluste durch Brände reduziert, aber mehr Humus schwindet
- das evolutionäre Lösen zeigt im Vergleich zur getrennten Bilanzierung bereits signifikante Unterschiede bei Modellierungszeiten ab 15 Jahren
- starker Bevölkerungsanstieg führt zu höheren CO₂eq-Emissionen; diese lassen sich jedoch durch verbesserte Technologien in Energie- und Forstwirtschaft weitgehend kompensieren
- im günstigsten Fall (NAP) steigen die CO₂eq im Jahr 2020 um 30%, im ungünstigsten Fall (ORS) um das 1,4-fache gegenüber 1990 an
- der Holzvorrat des Waldes nimmt stetig ab. Holz ist in diesem Fall kein CO₂ neutraler Brennstoff, da weniger Kohlenstoff gebunden wird, als CO₂eq über Verbrennung freigesetzt werden
- die Modellierung mit zellulären Gütern zeigt, dass sich der Holzvorrat der Wälder schneller regeneriert, als bislang angenommen wurde, da zukünftig mehr jüngere Bestände auf der Fläche sind, deren Wachstumsraten die der älteren übertreffen
- auf Grund der Wachstumsdynamik junger Bestände in übernutzten Gebieten kann nicht mit durchschnittlichen Wachstumsraten von jungen und alten Beständen gerechnet werden
- Feuer und Erosion haben eine geringere mittelfristige Bedeutung für die Regeneration von Waldbeständen. Sie beeinflussen die CO₂eq-Bilanz jedoch erheblich
- der Bodenspeicher nimmt jährlich um maximal 0,2% ab; er trägt im Jahr 2020 mit knapp 3,5% zur jährlichen CO₂eq-Bilanz im Untersuchungsgebiet bei

6.2 Ausblick

Betrachtet man die Ergebnisse der vorliegenden Fallstudie unter Klimaschutzaspekten, so ist brisant, dass sich auch unter günstigsten Rahmenbedingungen keine Reduktion der Treibhausgase unter das Niveau von 1990 ergibt und diese sich nur minimal unter das Niveau von 2000 (geplantes Basisjahr für Entwicklungsländer) mindern lassen. Für ein Entwicklungsland kann es wirtschaftlich sinnvoll sein, das Kioto-Protokoll zu ratifizieren, weil die Anerkennung von CDM-Projekten (Clean Development Mechanism) nur in den Ländern möglich ist, die es unterzeichnet haben.

Für eine Anerkennung von CDM-Projekten ist es erforderlich, dass die Maßnahmen transparent, nachvollziehbar und verifizierbar dokumentiert werden. Die Unterzeichnerstaaten des Kioto-Protokolls haben sich zu seiner Erfüllung rechtlich verbindlich verpflichtet. Das Problem ist, dass rechtlich verbindliche Kontrollsysteme zur Überprüfung der Einhaltung der Reduktionsverpflichtung weitgehend fehlen. Deshalb entwickelt beispielsweise / CARBOEUROPE, 2003/ seit einigen Jahren ein Monitoring-System für die CO₂-Bilanz der Biosphäre in Europa. Ziel ist die transparente und konsistente Quantifizierung von einzelnen Projekten bis zur kontinentalen Ebene. Für Entwicklungsländer fehlen ebenfalls verbindliche Monitoring-Systeme. Die Auswirkungen von Maßnahmen im Gesamtsystem dürften noch schwieriger zu kontrollieren und zu bewerten sein, weil im Vergleich zu Europa weniger Daten zur Verfügung stehen und die Projektrisiken höher sind. Zudem können separat betrachtete Projektmaßnahmen gegenläufige Effekte bewirken, die anderen Zielsetzungen der Entwicklungsländer zuwider laufen. So sind beispielsweise Aufforstungsmaßnahmen wichtig, um die Lebensgrundlage der ländlichen Bevölkerung zu unterstützen. Auf der anderen Seite konnte anhand der Fallstudie gezeigt werden, dass mit zunehmender Holzmasse auch die Emissionen in Folge von Waldbränden steigen können. Diesen Unsicherheiten trägt die Europäische Union Rechnung, indem ein Handel mit Zertifikaten aus CDM-Aufforstungsprojekten erst ab 2008 erwogen wird /BMU, 2004/.

Obwohl der internationale Emissionshandel innerhalb der Europäischen Union pünktlich mit dem Jahr 2005 einsetzen soll, und dieser Entschluss in Fachkreisen mehrheitlich begrüßt wird, birgt ein Handel mit Emissionszertifikaten aus CDM-Projekten neben den Chancen auch zahlreiche Risiken für alle Beteiligten, da viele Randbedingungen in Entwicklungsländern zumindest unscharf sind. Hier sind neben dem technischen Systemverhalten, wie es in dieser Arbeit weiterentwickelt wurde, sozio-ökonomische Aspekte zu nennen. Als Kritik am vorgeschlagenen Prozedere zur Einbeziehung von CDM-Projekten in den Emissionshandel kann angeführt werden, dass die Auswirkungen eines Emissionshandels ohne Kenntnis der technischen, sozio-ökonomischen, ökologischen und rechtlichen Rahmenbedingungen sehr unsicher sind. Die Völkergemeinschaft unterstellt, dass die entsprechenden Projektrisiken mit einer objektiven und/oder subjektiven Wahrscheinlichkeit zu berechnen seien. In vielen Entwicklungsländern stellt sich eher die Frage, ob die Unsicherheiten derzeit überhaupt quan-

tifizierbar sind, weil die Umweltzustände - im weitesten Sinne - extrem vage und somit ungewiss sind. Auf diesem Gebiet besteht weiterer Forschungsbedarf.

Die Wirtschaftlichkeit von möglichen CDM-Projekten muss ebenfalls geprüft werden. Denn gerade in den Entwicklungsländern können auf Grund der massiven Armut umweltpolitische Instrumente nur dann greifen, wenn sie gleichzeitig wirtschaftliche Anreize bieten. Einige Industrieländer denken darüber nach, wie die Infrastruktur in Entwicklungsländern verbessert werden kann, um das Investitionsumfeld kalkulierbarer zu gestalten. Denn letztendlich ist es für die unternehmerische Entscheidung wichtig, die Rahmenbedingungen der Investition (wirtschaftliches Risiko einschließlich der Barrierenabschätzung) möglichst genau zu erfassen. Zu diesem Themenkomplex lassen sich wirtschaftliche Modelle entwickeln. Eine Anbindung an das in dieser Arbeit entwickelte Modell zur systemübergreifenden CO₂-Bilanzierung ist möglich.

In einem weiteren Ansatz könnte auch geprüft werden, wie sich Regulierungen durch Steuern auf die Emissionen in Entwicklungsländern auswirken, wenn beispielsweise die Tobin-Steuer als Instrument zur Verbesserung der Energieinfrastruktur eingesetzt wird. Sie ist nicht als Finanzierungsinstrument für direkte Investitionen in Projekten gedacht, sondern eine Steuer, die in Industrieländern erhoben werden könnte, um als Strukturausgleich in die Entwicklungsländer zu fließen. Bei diesen Überlegungen gilt es jedoch zwei grundsätzliche Punkte zu beachten. Zum einen ist davon auszugehen, dass eine solche Steuer nur dann erhoben werden kann, wenn die Weltwirtschaft floriert und sich aus dieser Steuer zusätzliche Absatzmöglichkeiten westlicher Techniken ergeben. Zum zweiten ergibt sich eine Nachhaltigkeit der Maßnahmen erfahrungsgemäß nur dann, wenn die Netz- und Anlagenbetreiber in Entwicklungsländern Aussichten auf Einzahlungsüberschüsse haben, auch nachdem die Subventionen ausgelaufen sind. Die nachhaltige Verbesserung des Investitionsumfeldes in Entwicklungsländern setzt letztendlich auch eine Weltwirtschaftsordnung mit partizipativer Gleichberechtigung voraus.

Wie erwähnt ist das evolutionäre Lösen ein geeignetes Verfahren zur integrierten Bilanzierung von Energie- und Waldsystemen. Der große Nachteil des evolutionären Lösens liegt in den langen Rechenzeiten, die bei der Analyse von vielen Modellperioden entstehen. Das hat zwei Ursachen. Erstens startet jeder Rechenlauf mit PlaNet und NATURE beim ersten Modelljahr und endet beim letzten Modelljahr. Zum zweiten muss jeder Rechenlauf händisch neu gestartet werden. Daher ist die Entwicklung eines Solvers sinnvoll, der beide Modelle automatisiert über die Modellierungszeit berechnen kann.

In weiteren Forschungsvorhaben wird es notwendig sein, das Modell um den Landwirtschafts- und um den Verkehrssektor zu erweitern.

/IPCC, 2001/ geht davon aus, dass die durch Landnutzungsänderung freigesetzten Treibhausgase das Klima am maßgeblichsten beeinträchtigen. Die Landwirtschaft spielt daher eine wesentliche Rolle im CO₂-Haushalt. Sie lässt sich ebenfalls über zelluläre Güter abbilden. Schwierigkeiten bestehen im Wesentlichen in der Beschaffung von Daten aus der Landwirt-

schaft in Entwicklungsländern, weil es bislang wenige zuverlässige Untersuchungen auf regionaler Ebene gibt, die, wie beispielsweise in Europa, auch aggregiert zur Verfügung stehen. Im Jahr 1995 wurden in Europa 427 Mt CO₂-Äquivalente aus der Landwirtschaft freigesetzt /Freibauer, Kaltschmitt, 2001/ und im Jahr 2000 rund 390 Mt CO₂-Äquivalente aus den Staaten der EU (15) /EUROSTAT, 2003/. Weltweit dürften die Emissionen aus der Landwirtschaft jedoch vor allem auf Grund der CH₄-Freisetzungen aus dem Reisanbau und der Viehhaltung um ein Vielfaches höher liegen.

Der Verkehrssektor wurde im Modell nicht berücksichtigt, weil er, abgesehen vom Straßenbau, keine direkten Auswirkungen auf den Wald hat. Weltweit wurden aus ihm im Jahr 2000 rund 4,8 Gt CO₂ /IEA, 2002/ ausgestoßen. Das entspricht einem Anteil an den globalen Treibhausgasemissionen von über 19%. Nach Prognosen der /IEA, 2002/ erhöhen sich die globalen CO₂-Emissionen aus dem Verkehr von 2000 bis 2020 um etwa 65%. Auf Grund des Bevölkerungsanstiegs und veralteten Technologien in Entwicklungsländern sollte es durch die Einführung neuer Fahrzeuge große Minderungspotenziale geben. Allerdings vertreten neuere Untersuchungen in den USA die These, dass neben einem Wandel der Landnutzung (vor allem Versiegelung und intensive Landwirtschaft) auch Luftreinhaltemaßnahmen einen hohen Einfluss auf das Klima haben können /Haas, 2002/. Die Klimaforscher stellten fest, dass Luftreinhaltemaßnahmen den Treibhauseffekt ankurbeln können. Denn die Schwebstoffe in der Luft (Aerosole) schirmen die Sonneneinstrahlung ab und vermindern dadurch die Erwärmung der Erde durch die Sonne. Andererseits werden Aerosole für den Treibhauseffekt mitverantwortlich gemacht, so dass man sie eher reduzieren möchte. Da dem Verkehr auch in dieser Hinsicht eine Schlüsselfunktion in der Treibhausgasdiskussion eingeräumt wird und indirekte Auswirkungen auf die Naturräume wahrscheinlich sind, ist seine Berücksichtigung sehr sinnvoll. Hierfür sind allerdings verfügbare Daten auf regionaler Ebene erforderlich.

Die aufgezeigten Synergieeffekte aus verschiedenen Sektoren lassen sich allenfalls über ein Gesamtmodell erfassen. Es ist zweckmäßig, dass ein solches Vorhaben von einem interdisziplinären Team aus Energie-, Verkehrs-, Forst- und Landwirtschaft durchgeführt wird.

Literaturverzeichnis

/AA, 2004/

AA (Auswärtiges Amt): http://www.auswaertiges-amt.de/www/de/laenderinfos/laender/laender_ausgabe

/Allouche, Courbage, Skordev, 2000/

Allouche, J-P., Courbage, M., Skordev, G.: Notes on cellular data, Institut für dynamische Systeme der Universität Bremen, Report Nr. 458, Bremen, 2000

/Braatz et al., 1996/

Braatz, V. B., Bubu, P. J., Molnar, S., Murdiyarso, D., Perdomo, M., Fitzgerald, J. F.: Greenhouse Gas Emission Inventories, Interim Results from the U.S. Country Study Programme, Environmental Science and Technology Library, Kluwer Academic Publishers, 1996

/Becher, 1998/

Becher, S.: Biogene Festbrennstoffe als Substitut für fossile Brennstoffe - Energie- und Emissionsbilanzen. Forschungsbericht IER Band 50, Stuttgart, 1998

/Beller, 1975/

Beller, M.: Sourcebook for Energy Assessment, Brookhaven National Laboratory (BNL-50493), Brookhaven, 1975

/Bertalanffy, 1968/

Bertalanffy, L. v.: General System Theory. George Braziller, New York, 1968

/Blesl et al., 1998/

Blesl, M., Schlenzig, C., Schweiker, A.: Erweiterung der Analysemöglichkeiten von Network - Der Netzwerkeditor, IER-Forschungsbericht Band 51, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Stuttgart, 1998

/BMWi, 2003/

BMWi: Zahlen und Fakten, Energie-Daten 2002, Nationale und internationale Entwicklung, Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, Berlin, 2003

/BMZ, 1999 a/

BMZ: Erneuerbare Energien und Nachhaltige Entwicklung, Bundesumweltministerium, 2. aktualisierte Auflage, Berlin, 1999

/BMZ, 1999 b/

BMZ: Probleme der Energieversorgung in Entwicklungsländer und Förderschwerpunkte zur Nutzung erneuerbarer Energien, in: Erneuerbare Energie für nachhaltige Entwicklung und Klimaschutz, Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung, Berlin, 1999

/BMU, 2004/

BMU: Pressedienst Nr. 97/04, 9. April 2004, Berlin, 2004

/Borota, 1991/

Borota, J.: Tropical forests. Some African and Asian case studies of composition and structure. Developments in Agricultural and Managed-Forest Ecology 22. Hs.: Elsevier, Amsterdam, Oxford, New York, Tokio, 1991

/Bosssel, 1994/

Bosssel, H.: Modeling and Simulation, Vieweg Verlag, Wiesbaden, 1994

/Brockhaus, 2000/

Brockhaus, F. A.: Lebensraum Erde, Brockhaus-Redaktion Mensch - Natur - Technik, Leipzig, Mannheim, 2000

/Brook et al., 1998/

Brook, A. et al.: GAMS - A User's Guide, GAMS Development Corporation, Washington DC, 1998

/Burger, 1995/

Burger, D.: Wälder als Retter der Klimakatastrophe? in: Die Wälder der Erde, Herkendell, J., Pretzsch, J., Verlag C. H. Beck, München, 1995

/Burschel, Weber, 1990/

Burschel, P.; Weber, M.: Der Wald als Kohlenstoffspeicher, in: Der Wald, Berlin, 1990

/Camos et al., 1986/

Camos, M. et al.: MEDEE 3- Modele de Demande en Énergie pour l'Europe - Description mathématiques et études des cas, Publication Numero EUR 10681 du Commission des Communautés Européennes, Brüssel, 1986

/Capros, 1995/

Capros, P. et al.: MIDAS 5.1 for EU-15 Model Description, Group of Economy-Energy-Environment-Modelling, National Technical University of Athens, Athens, 1995

/Charpentier et al., 1983/

Charpentier, J.P. et al.: Model for Analysis of the Energy Demand MAED, Section of Economic Studies, Division of Nuclear Power, International Atomic Energy Agency, Vienna, 1983

/CARBOEUROPE, 2003/

CARBOEUROPE: Der europäische Forschungsverbund "CarboEurope-Cluster", Pressemitteilungen der MPG, Eine gezielte Landbewirtschaftung kann das Klima-Problem für Europa nicht lösen, Amsterdam, Jena, 2003

/CEEST, 1994/

CEEST: The Centre of Energy, Environment Science and Technology, Sources and Sinks of GHG in Tanzania for 1990, CEEST Report No. 5, Dar es Salaam, 1994

/CEEST, 1997/

CEEST: The Centre of Energy, Environment Science and Technology, Application of Long-Range Energy Planning (LEAP) in Tanzania (1996), Internal Discussion Paper, 1997, Dar es Salaam, 1997

/Chidumayo, 1997/

Chidumayo, E.: Miombo Ecology and Management an Introduction, IT Publications in association with the Stockholm Environment Institute, Lusaka, Stockholm, 1997

/Chidumayo, 2001/

Chidumayo, E.: Persönliche Mitteilung Prof. Dr. Emanuel Chidumayo, The Biological Sciences Department, University of Zambia, Lusaka, 2001

- /CIA,1999/
CIA: World Fact book, 1999, zitiert nach <http://www.bng-online.de/projekte/tansania/vergleich.htm>, 2002
- /Criqui et al., 1996/
Criqui, P. et al.: POLES 2.2 - Prospective Outlook on Longterm Energy Systems, Reference Guide, Institute d'Economie et de Politique de l'Energie (IEPE), Grenoble, 1996
- /Criqui et al., 1997/
Criqui, P. et al.: POLES - Prospective Outlook on Long-term Energy Systems, Institute d'Economie et de Politique de l'Energie (IEPE), Grenoble, 1997
- /Davidson, Lefebvre, 1993/
Davidson, E. A., Lefebvre, P. A.: Estimating regional carbon stocks and spatially covarying edaphic factors using soil amps at three scales, in: Biochemistry Nr. 22, S. 107-131, Kluwer Academic Publishers, The Netherlands, 1993
- /Duden, 2000/
Duden: Rechnen und Mathematik, Meyers Lexikonredaktion, Scheid, H. Dudenverlag, 6. überarbeitete Auflage, Mannheim, Leipzig, Wien, Zürich, 2000
- /Enquete Kommission, 1988/
Enquete Kommission: Schutz der Erdatmosphäre, Berlin, 1987
- /Erdkunde-online, 2002/
Erdkunde-online: www.erdkunde-online.de, 2002
- /EEA, 2004/
EEA: European Environment Agency, Annual European Community greenhouse gas inventory 1990 - 2002 and inventory report 2004, Submission to the UNFCCC Secretariat, EEA Technical report, Copenhagen, 2004
- /EUROSTAT, 2003/
EUROSTAT: Verringerung der Treibhausgasemissionen der europäischen Landwirtschaft um 6,4% (1990-2000), Statistik kurzgefasst, Thema 8-1/2003, Europäische Gemeinschaften, 2003
- /FAO, ISRIC, 1990/
FAO, ISRIC: Guidelines for Soil Description. Food and Agriculture Organization, Rome, 1990
- /Fearnside, 1997/
Fearnside, P. M.: Amazonian deforestation and global warming carbon stocks in vegetation replacing Brazil's amazon forest, Ecological Manager Vol. 80, Nr. 1-3, 1996. S. 21. Zitiert nach Orthofer, Nevyjel, 1997, Literaturübersicht V zum Thema „Treibhauseffekt, Austrian Research Center, Wien, 1997
- /Feller, 1968/
Feller, W.: An introduction to probability theory and its application, Band 1/2, John Wiley & Sons, New York, Chisester, Brisbane, Toronto, 1968
- /Frey, Neubauer, 2002/
Frey, B., Neubauer, M.: Energy Supply for Three Cities in Southern Africa, IER-Forschungsbericht Band 90, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Stuttgart, 2002

/Freibauer, Kaltschmitt, 2001/

Biogenic Greenhouse Gas Emissions from Agriculture in Europe, IER-Forschungsbericht Band 78, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Stuttgart, 2001

/Gadow, Hui, 1999/

Gadow, K. v., Hui, G.: Modelling Forest Development. Hs.: Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Boston, London, 1999

/Gerhard, Schuster, 1995/

Gerhard, M., Schuster, H.: Das digitale Universum. Zelluläre Automaten als Modelle der Natur. Hs.: Friedr. Vieweg & Sohn mbH, Braunschweig, Wiesbaden, 1995

/Geyer, Klaiß, 1998/

Geyer, M., Klaiß, H.: 194 MW Solarstrom mit Rinnenkollektoren, Fachaufsatz in: Forum Sonnenenergienutzung, BWK Band 41, Düsseldorf, 1998

/Goldammer, 1993/

Goldammer, J.-G.: Feuer in Waldökosystemen der Tropen und Subtropen, Birkhäuser Verlag, Basel, Boston, Berlin 1993

/Grammel, 1989/

Grammel, R.: Forstbenutzung, Technologie, Verwertung und Verwendung des Holzes, Institut für Forstbenutzung und forstliche Arbeitswissenschaft, Freiburg i. Br., Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin, 1989

/Hamilton, Bensted-Smith, 1989/

Hamilton, A. C., Bensted-Smith, R.: Forest Conservation in the East Usambara Mountains Tanzania, IUCN, Gland Switzerland and Cambridge, Uk, 1989

/Haas, 2002/

Haas, L.: Schlimmer sind die Holzfäller, VDI-Nachrichten, 18. Oktober 2002, Nr. 42, Düsseldorf, 2002

/Hasslacher, 1987/

Hasslacher, B.: Discrete fluids, Los Alamos Science, 1987

/Herkendell, Pretzsch, 1995/

Herkendell, J., Pretzsch, J.: Die Wälder der Erde, Bestandsaufnahme und Perspektiven. Hs.: C. H. Beck, München, 1995

/Hofmeier, Mehler, 2002/

Hofmeier, R., Mehler, A.: Afrika Jahrbuch 2001, Politik, Wirtschaft und Gesellschaft in Afrika südlich der Sahara, Institut für Afrika-Kunde, Leske + Budrich, Opladen, 2002

/Houghton, 1990/

Houghton, R.A.: The global effects of tropical deforestation, in: Environmental Science and Technology Nr. 24, 414-442, USA, 1990

/Hossier, Richard, 1994/

Hossier, P., Richard, H.: Urban Development in Tanzania, A Tale of Three Cities, Stockholm Environment Institute, Stockholm, 1994

/Hundeshagen, 1826/

Hundeshagen, C.: Die Forstabschätzung auf neuen wissenschaftlichen Grundlagen, nebst einer Charakteristik und Vergleichung aller bisher bestandenen Forsttaxations-Methoden, Lauppsche Buchhandlung, Tübingen, 1826

/IAEA, 1986/

IAEA: Model for Analysis of the Energy Demand MEAD - User Manual For Version MAED-1, International Atomic Energy Agency, Wien, 1986

/IAEA, 1995/

IAEA: Computer Tools for Comparative Assessment of Electricity Generation Options and Strategies, DECADES Project Document Number 5, International Atomic Energy Agency, Wien, 1995

/IAEA, 2000/

IAEA: Enhanced Electricity System Analysis for Decision Making - A Reference Book, International Atomic Energy Agency, Wien, 2000

/IEA, 2000/

IEA: Statistics, <http://library.iaea.org>, 2000

/IEA, 2002/

IEA: World Energy Outlook, <http://www.worldenergyoutlook.org/> 2002

/ICRAF, 2004/

ICRAF (International Centre for Research in Agroforestry): <http://www.worldagroforestry.org/Sites/TreeDBS/Botanic/botanic.htm>

/IPCC, 1996/

IPCC: Intergovernmental Panel of Climate Change, Washington D.C., 1996

/IPCC, 1997/

IPCC: Edited by Filho, L., Griggs, D., Houghton, T., Maskell, K., Intergovernmental Panel of Climate Change, An introduction to Simple Climate Models used in the IPCC Second Assessment Report, Washington D.C., 1997

/IPCC, 2000/

IPCC: Intergovernmental Panel of Climate Change, Washington D.C., 2000

/IPCC, 2001/

IPCC: Land Use, Land Use Change and Forestry, Intergovernmental Panel of Climate Change, Washington D.C., 2001

/Jambiya, 2001/

Jambiya, G.: persönliche Mitteilung während eines Arbeitsaufenthaltes in Tansania, University of Dar es Salaam, Department of Geography, Dar es Salaam, 2001

/Jégourel, 2002/

Jégourel, Y.: La Taxe Tobin, La Découverte & Syros, Paris, 2002

/Jenbacher, 2001/

Jenbacher: Kraft - Wärme - Kopplung mit Gasmotoren, Informationsbroschüre, Jenbach, 2002

/Jungbluth et al. 2002/

Jungbluth, N., Frischknecht, R., Faist, M.: Ökobilanz für die Stromerzeugung aus Holzbrennstoffen und Altholz, Schlussbericht, Bundesamt für Energie, BFE, Ittingen, 2002

/Kaltschmitt, Reinhardt, 1997/

Kaltschmitt, M., Reinhardt, G. A.: *Nachwachsende Energieträger, Grundlagen, Verfahren, ökologische Bilanzierung*, Vieweg Verlag, Braunschweig, 1997

/Kaltschmitt, 2000/

Kaltschmitt, M.: *Regenerative Energieträger zur Stromerzeugung II, Vorlesungsskript*, IER, Universität Stuttgart, 2000

/Kouba, 1974/

Kouba, J.: *Die Markowschen Ketten und die Definition des Normalwaldes. Internationales Forsteinrichtungssymposium 25.09. - 28.09. 1973, Themenkomplex 4, Band II, Seiten 381-390*, TU Dresden, Dresden, 1974

/Kioto-Protokoll, 1997/

Kioto-Protokoll: *Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change*, 1997

/Kleemann, 2002/

Kleemann, M.: *Modellgestützte Energiesystemanalyse zur Unterstützung umwelt- und energiepolitischer Entscheidungen*, In: *Energiehandbuch*, Rebhan, E., Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2002

/Krause, Neumann, 1999/

Krause, U., Neumann, T.: *Differenzgleichungen und diskrete dynamische Systeme*, B. G. Teubner, Stuttgart, Leipzig, 1999

/Kühner, 1996/

Kühner, R.: *Ein verallgemeinertes Schema zur Bildung mathematischer Modelle energiewirtschaftlicher Systeme*, IER-Forschungsbericht Band 35, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Stuttgart, 1996

/La Marche et al., 1984/

La Marche, V. C., Graybill, D. A., Fritts, H., Rose, M. R.: *Increasing Atmospheric Carbon Dioxide: tree Ring Evidence for Growth Enhancement in Natural Vegetation*. *Science*, 1984, Vol 225, S. 1019-1021, 1984

/LEAP, 1997/

LEAP: *User Guide for Version 95.0, (Long-range Energy Alternatives Planning System)*, Stockholm Environment Institute, Tellus Institute, Boston, 1995

/LEAP, 2002/

LEAP: *User Guide for Version LEAP 2000, (Long-range Energy Alternatives Planning System)*, <http://leap.sourceforge.net/user.htm>, Stockholm Environment Institute, Tellus Institute, Boston, 2002

/Le Roux et al., 2001/

Le Roux, X., Lacoïnte, A., Escobar-Gutiérrez, A., Le Dizès, S.: *Carbon-based models of individual tree growth: A critical appraisal*, CNRS-Universität Lyon, EDP Science, Lyon, Villeurbanne, 2001

/Löffler, 1995/

Löffler, H.: *Persönliche Mitteilung Prof. Dr. Dr. habil. Hans Löffler*, Institut für forstliche Arbeitswissenschaft und Informatik, Forstwissenschaftliche Fakultät, Universität München, 1995

/Malimbwi et al., 2001/

Malimbwi, R., Misana, S., Monela, G., Jambiya, G., Nduwamungu, J.: Final Report for Tanzania, Dar es Salaam, 2001, in: Charcoal Potential in Southern Africa (CHAPOSA), Stockholm Environment Institute, Dar es Salaam, Morogoro, Stockholm, 2001

/Molt, 2001/

Molt, S.: Entwicklung eines Instrumentes zur Lösung großer energiesystemanalytischer Optimierungsprobleme durch Dekomposition und verteilte Berechnung, IER-Forschungsbericht Band 84, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Stuttgart, 1996

/Müller-Merbach, 1971/

Müller-Merbach, H.: Operations Research, Methoden und Modelle der Optimalplanung, 2. Auflage, S.451-469, München, 1971

/Mwandosya et al., 1999/

Mwandosya et al.: Climate Change Mitigation in Southern Africa - Tanzania Case Study, The Centre for Energy, Environment, Science and Technology, Dar es Salaam, 1999

/Oberberger, 2000/

Oberberger, I.: Thermische Nutzung fester biogener Brennstoffe, Institut für Grundlagen der Verfahrenstechnik und Anlagentechnik, Technische Universität Graz, 2000

/Öko Institut, 2003/

Öko Institut: Gesamt-Emissions-Modell Integrierter Systeme (Gemis Datenbank), Öko Institut, Darmstadt, Berlin, Freiburg, Kassel, 2003

/Paulsen, 1995/

Paulsen, J.: Der biologische Kohlenstoffvorrat der Schweiz. Hrg.: Verlag Rüegger AG, Chur, Zürich, 1995

/Pereira et al., 2001/

Pereira, C., Brouwer, R., Monjane, M., Falcao, M.: Final Report for Mozambique, Maputo, 2001, in: Charcoal Potential in Southern Africa (CHAPOSA), Stockholm Environment Institute, Maputo, Stockholm, 2001

/Pretzsch, Seifert, 2000/

Pretzsch, H., Seifert, S.: Methoden zur Visualisierung des Waldwachstums, in: Forstwissenschaftliches Centralblatt, Blackwell Wissenschaftsverlag, Berlin, 2000

/Rein, 1995/

Rein, A.: Zelluläre Automaten in der Transporttheorie: Konzepte und Anwendungen, Fakultät für Physik der Technischen Universität München, Hieronymus Buchreproduktions GmbH, München, 1995

/Rivas, 2001/

Rivas, S.: Ein agro-ökologisches regionalisiertes Modell zur Analyse des Brennholzversorgungssystems in Entwicklungsländern, IER-Forschungsbericht Band 76, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Stuttgart, 2001

/Sawe, 2001/

Sawe, E. N.: persönliche Mitteilung während eines Arbeitsaufenthaltes in Tansania, Traditional Energy Development and Environment Organisation (TaTEDO), Dar es Salaam, 2001

/Schilling, 1995/

Schilling, J.: Technik der Biomassevergasung - Grundlagen und Ausführungsbeispiele, Studienarbeit IER, Band 0201, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Universität Stuttgart, 1995

/Schlamadinger, Marland, 1994/

Schlamadinger, B., Marland, G.: Carbon implications of forest management strategies, in: Forest Ecosystems, Forest Management and the Global Carbon Cycle, Springer in cooperation with NATO Scientific Affairs Division, Edmonton, 1994

/Schlenzig, 1998/

Schlenzig, C.: PlaNet: Ein entscheidungsunterstützendes System für die Energie- und Umweltplanung, IER-Forschungsbericht Band 47, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Stuttgart, 1998

/Schmaltschinski, 1998/

Schmaltschinski, T.: Regionale Waldwachstumsprognose, Schriftenreihe Freiburger Forstliche Forschung, Band 12, Forstwissenschaftliche Fakultät der Universität Freiburg und Forstliche Versuchsanstalt Baden-Württemberg, Freiburg, 1998.

/Siebert, 1997/

Siebert, H.: Weltwirtschaft, UTB Für Wissenschaft, Lucius & Lucius, Stuttgart, 1997

/Sombroeck et al., 1999/

Sombroeck, W.G., Fearnside, P.M., Cravo, M.: Geographic assessment of carbon stored in Amazonian terrestrial ecosystems and their soils in particular, In: Global Climate Change and Tropical Ecosystems, Seiten 375-389, Boca Raton, Florida, 1999

/Spiecker, 1974/

Spiecker, H.: Die Simulation als Entscheidungshilfe in der Forstlichen Planung, Dissertation an der Forstwissenschaftlichen Fakultät, Albert-Ludwigs-Universität zu Freiburg im Breisgau, 1974

/Stuible, 2002/

Stuible, A.: Ein Verfahren zur graphentheoretischen Dekomposition und algebraischen Reduktion von komplexen Energiesystemmodellen, IER-Forschungsbericht Band 93, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Stuttgart, 2002

/Tamme, 2002/

Tamme, R.: Speichern von Energie, in: Energiehandbuch, Rebhan, E., Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2002

/Töpfer, 2000/

Töpfer, K.: Die Ökosteuer ist keine K.-o.-Steuer, in: Die Zeit, 26. Oktober 2000, Nr. 44, Hamburg, 2000

/Trexler, 1993/

Trexler, M.: Mitigating Global Warming through Forestry: A Partial Review prepared for GTZ, 1993

/TROLL, 2002/

TROLL: Portable TROLL User's Guide, http://www.intex.com/adh/troll/ug/ug1.html#MODEL_CREATION, 2002

/van Asperen, 2001/

van Asperen, S. A.: Improvement of Production and Management Processes of Metal-Ceramic Charcoal Stoves in Dar es Salaam, TATEDO and University of Twente, Dar es Salaam, 2001

/Voort et al., 1984/

Voort, E. et al.: Energy Supply Modelling Package - EFOM 12 C, User's Guide and mathematical description, Volume I - III, Commission of the European Communities DG XII, Brussels, 1984

/Veldkamp, 2001/

Veldkamp, E.: Persönliche Mitteilung Prof. Dr. Dr. habil Veldkamp, Institut für Bodenkunde in Göttingen. E-mail vom 19.10.01, Göttingen, 2001

/VDI, 1996/

VDI: VDI-Richtlinie 3633, Simulation von Logistik-, Materialfluß- und Produktionssystemen - Begriffsdefinitionen, Verein Deutscher Ingenieure (VDI), Beuth Verlag, Berlin, 1996

/von Neumann, 1966/

Neumann v., J.: Theory of Self-Reproducing Automata, University of Illinois Press, Chicago, 1966

/Voß, 2002/

Voß, A.: Systemtechnische Planungsmethoden in Wirtschaft und Technik, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Skript zur Vorlesung, Universität Stuttgart, 2002

/Voß, 1999/

Voß, A.: Energiesysteme I, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Skript zur Vorlesung, Universität Stuttgart, 1999

/Wamukonja, 2001/

Wamukonja, N.: persönliche Mitteilung während eines Arbeitsaufenthaltes in Tansania, Ministry of Energy, Department of Energy Planning, Dar es Salaam, 2001

/Weber et al., 1997/

Weber, C., Schuler, A., Gebhardt, B., Hermes, H.-D., Fahl, U., Voß, A.: Grundlagenuntersuchungen zum Energiebedarf und seinen Bestimmungsfaktoren, IER Forschungsbericht, Band 44, Stuttgart, 1997

/Weimer-Jehle, 1996/

Weimer-Jehle, W.: ENSYS V2.2, Programm zur energetischen Bilanzierung von Energiesystemen - Bedienungsanleitung, Akademie für Technikfolgenabschätzung, Baden-Württemberg, Stuttgart, 1996

/Weimer-Jehle, 1997/

Weimer-Jehle, W.: Das Energiesystem - Sektoren und Gestaltungsspielräume, Arbeitsmaterialien zu ENSYS, Akademie für Technikfolgenabschätzung, Baden-Württemberg, Stuttgart, 1997

/Weinmann, 1999/

Weinmann, J.: Entwicklung eines parallelen Algorithmus zur diskreten Simulation von Energiesystemen, Verlag Grauer, Stuttgart, 1999

/Winiwarter, Rypdal, 2001/

Winiwarter, W., Rypdal, K.: Assessing the Uncertainty Associated with National Greenhouse Gas Emissions Inventories: A case study for Austria. Atmos. Environ. 35, Wien, 2001

/Wirt, 1972/

Wirt, N: Systematisches Programmieren: Eine Einführung, Teubner, Stuttgart, 1972

/World Bank, 1996/

World Bank: Rural Energy and Development. Improving Energy Supplies for Two Billion People. Hs.: The International Bank for Reconstruction and Development, The World Bank. Washington, D. C., 1996

/World Bank, 1997/

World Bank: Weltentwicklungsbericht The World Bank, Washington, D. C., 1997

/World Bank, 1998/

World Bank, World Development Indicators, Washington, D. C., 1998

/World Bank, 2002/

World Bank: Infrastructure for the rural poor, Plenar Discussion on the Workshop, July 3, 2002, London, 2002

/Zuse, 1975/

Zuse, K.: Ansätze einer Theorie des Netzautomaten, Nova Acta Leopoldina, Abhandlungen der Deutschen Akademie der Naturforscher Leopoldina, Band 43, Halle, Saale, 1975

Verbesserter Meiler	Emission Factor	C-Holz*CO2	TAN	t/t	0,3780
Verbesserter Meiler	Emission Factor	C-Holz*CH4	TAN	t/t	0,0081
Verbesserter Meiler	Emission Factor	C-Holz*N2O	TAN	t/t	0,0000
Verbesserter Holzherd	Emission Factor	Brennholz*CO2	TAN	t/t	1,3730
Verbesserter Holzherd	Emission Factor	Brennholz*N2O	TAN	t/t	0,0003
Verbesserter Holzherd	Emission Factor	Brennholz*CH4	TAN	t/t	0,0041
Transporte	Emission Factor	Diesel 1*CH4	TAN	t/t	0,0001
Transporte	Emission Factor	Diesel 1*CO2	TAN	t/t	3,1750
Transporte	Emission Factor	Diesel 1*N2O	TAN	t/t	0,0001
Traditioneller Meiler	Emission Factor	C-Holz*CO2	TAN	t/t	0,4397
Traditioneller Meiler	Emission Factor	C-Holz*CH4	TAN	t/t	0,0108
Traditioneller Meiler	Emission Factor	C-Holz*N2O	TAN	t/t	0,0000
Professioneller Meiler	Emission Factor	C-Holz*CH4	TAN	t/t	0,0061
Professioneller Meiler	Emission Factor	C-Holz*CO2	TAN	t/t	0,3340
Professioneller Meiler	Emission Factor	C-Holz*N2O	TAN	t/t	0,0000
Kohlekraftwerk	Emission Factor	Steinkohle*CO2	TAN	t/t	2,3338
Kohlekraftwerk	Emission Factor	Steinkohle*N2O	TAN	t/t	0,0001
Kohlekraftwerk	Emission Factor	Steinkohle*CH4	TAN	t/t	0,0000
Gaskocher	Emission Factor	Gas 2*CO2	TAN	t/t	2,2480
Gaskocher	Emission Factor	Gas 2*CH4	TAN	t/t	0,0000
Gaskocher	Emission Factor	Gas 2*N2O	TAN	t/t	0,0000
Gas Turbine	Emission Factor	Gas 1*CO2	TAN	t/t	2,5452
Gas Turbine	Emission Factor	Gas 1*CH4	TAN	t/t	0,0002
Gas Turbine	Emission Factor	Gas 1*N2O	TAN	t/t	0,0001
Dieselaggregat	Emission Factor	Diesel 1*CO2	TAN	t/t	3,1693
Dieselaggregat	Emission Factor	Diesel 1*N2O	TAN	t/t	0,0001
Dieselaggregat	Emission Factor	Diesel 1*CH4	TAN	t/t	0,0001
Brennstoff-Gel Kocher	Emission Factor	Brennstoff-Gel 2*CO2	TAN	t/t	3,0600
Brennstoff-Gel Kocher	Emission Factor	Brennstoff-Gel 2*N2O	TAN	t/t	0,0000
Brennstoff-Gel Kocher	Emission Factor	Brennstoff-Gel 2*CH4	TAN	t/t	0,0000
Biomasse Kraftwerk	Emission Factor	Biomasse*CO2	TAN	t/t	1,6389
Biomasse Kraftwerk	Emission Factor	Biomasse*CH4	TAN	t/t	0,0072
Biomasse Kraftwerk	Emission Factor	Biomasse*N2O	TAN	t/t	0,0004
3-Steine Herd	Emission Factor	Brennholz*CO2	TAN	t/t	1,4600
3-Steine Herd	Emission Factor	Brennholz*CH4	TAN	t/t	0,0020
3-Steine Herd	Emission Factor	Brennholz*N2O	TAN	t/t	0,0002

Tabelle: Emissionsfaktoren aus der MESAP Datenbank

Datenbasis: /CARBOEUROPE, 2003/, /EEA, 2004/, /EUROSTAT, 2003/, /Grammel, 1989/, /Houghton, 1990/, /IEA, 2002/, /Jenbacher, 2001/, /Jungbluth et al. 2002/, /Kaltschmitt, Reinhardt, 1997/, /Kaltschmitt, 2000/, /Oberberger, 2000/, /Öko Institut, 2003/

Forschungsberichte des Instituts für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung

Bezugsadresse: Universität Stuttgart
 Institut für Energiewirtschaft
 und Rationelle Energieanwendung
 - Bibliothek -
 D-70550 Stuttgart

Tel.: 0711 / 685 87861
Fax: 0711 / 685 87873
E-Mail: bib@ier.uni-stuttgart.de

Bestellungen sind auch über Internet möglich:
<http://www.ier.uni-stuttgart.de>

- Band 97 B. Frey
Modellierung systemübergreifender Energie- und Kohlenstoffbilanzen in Entwicklungsländern
Mai 2006, 148 Seiten, 13 €
- Band 96 K. Sander
Potenziale und Perspektiven stationärer Brennstoffzellen
Juni 2004, 256 Seiten, 18 €
- Band 95 M. A. dos Santos Bernardes
Technische, ökonomische und ökologische Analyse von Aufwindkraftwerken
März 2004, 228 Seiten, 15 €
- Band 94 J. Bagemihl
Optimierung eines Portfolios mit hydro-thermischem Kraftwerkspark im börslichen Strom- und Gasterminmarkt
Februar 2003, 138 Seiten, 10 €
- Band 93 A. Stuible
Ein Verfahren zur graphentheoretischen Dekomposition und algebraischen Reduktion von komplexen Energiesystemmodellen
November 2002, 156 Seiten, 13 €
- Band 92 M. Blesl
Räumlich hoch aufgelöste Modellierung leitungsgebundener Energieversorgungssysteme zur Deckung des Niedertemperaturwärmebedarfs
August 2002, 282 Seiten, 18 €

- Band 91 S. Briem, M. Blesl, M. A. dos Santos Bernardes, U. Fahl, W. Krewitt, M. Nill, S. Rath-Nagel, A. Voß
Grundlagen zur Beurteilung der Nachhaltigkeit von Energiesystemen in Baden-Württemberg
August 2002, 138 Seiten, 10 €
- Band 90 B. Frey, M. Neubauer
Energy Supply for Three Cities in Southern Africa
Juli 2002, 96 Seiten, 8 €
- Band 89 A. Heinz, R. Hartmann, G. Hitzler, G. Baumbach
Wissenschaftliche Begleitung der Betriebsphase der mit Rapsölmethylester befeuerten Energieversorgungsanlage des Deutschen Bundestages in Berlin
Juli 2002, 212 Seiten, 15 €
- Band 88 M. Sawillion
Aufbereitung der Energiebedarfsdaten und Einsatzanalysen zur Auslegung von Blockheizkraftwerken
Juli 2002, 136 Seiten, 10 €
- Band 87 T. Marheineke
Lebenszyklusanalyse fossiler, nuklearer und regenerativer Stromerzeugungstechniken
Juli 2002, 222 Seiten, 15 €
- Band 86 B. Leven, C. Hoeck, C. Schaefer, C. Weber, A. Voß
Innovationen und Energiebedarf - Analyse ausgewählter Technologien und Branchen mit dem Schwerpunkt Stromnachfrage
Juni 2002, 224 Seiten, 15 €
- Band 85 E. Laege
Entwicklung des Energiesektors im Spannungsfeld von Klimaschutz und Ökonomie - Eine modellgestützte Systemanalyse
Januar 2002, 254 Seiten, 15 €
- Band 84 S. Molt
Entwicklung eines Instrumentes zur Lösung großer energiesystem-analytischer Optimierungsprobleme durch Dekomposition und verteilte Berechnung
Oktober 2001, 166 Seiten, 13 €
- Band 83 D. Hartmann
Ganzheitliche Bilanzierung der Stromerzeugung aus regenerativen Energien
September 2001, 228 Seiten, 15 € (z. Zt. vergriffen)

- Band 82 G. Kühner
Ein kosteneffizientes Verfahren für die entscheidungsunterstützende Umweltanalyse von Betrieben
September 2001, 210 Seiten, 15 €
- Band 81 I. Ellersdorfer, H. Specht, U. Fahl, A. Voß
Wettbewerb und Energieversorgungsstrukturen der Zukunft
August 2001, 172 Seiten, 13 €
- Band 80 B. Leven, J. Neubarth, C. Weber
Ökonomische und ökologische Bewertung der elektrischen Wärmepumpe im Vergleich zu anderen Heizungssystemen
Mai 2001, 166 Seiten, 13 €
- Band 79 R. Krüger, U. Fahl, J. Bagemihl, D. Herrmann
Perspektiven von Wasserstoff als Kraftstoff im öffentlichen Straßenpersonenverkehr von Ballungsgebieten und von Baden-Württemberg
April 2001, 142 Seiten, 13 € (*z. Zt. vergriffen*)
- Band 78 A. Freibauer, M. Kaltschmitt (eds.)
Biogenic Greenhouse Gas Emissions from Agriculture in Europe
Februar 2001, 248 Seiten, 15 €
- Band 77 W. Rüffler
Integrierte Ressourcenplanung für Baden-Württemberg
Januar 2001, 284 Seiten, 18 € (*z. Zt. vergriffen*)
- Band 76 S. Rivas
Ein agro-ökologisches regionalisiertes Modell zur Analyse des Brennholzversorgungssystems in Entwicklungsländern
Januar 2001, 200 Seiten, 15 € (*z. Zt. vergriffen*)
- Band 75 M. Härdtlein
Ansatz zur Operationalisierung ökologischer Aspekte von "Nachhaltigkeit" am Beispiel der Produktion und Nutzung von Triticale (*×Triticosecale* Wittmack)-Ganzpflanzen unter besonderer Berücksichtigung der luftgetragenen N-Freisetzungen
September 2000, 168 Seiten, 13 €
- Band 74 T. Marheineke, W. Krewitt, J. Neubarth, R. Friedrich, A. Voß
Ganzheitliche Bilanzierung der Energie- und Stoffströme von Energieversorgungstechniken
August 2000, 118 Seiten, 10 € (*z. Zt. vergriffen*)
- Band 73 J. Sontow
Energiewirtschaftliche Analyse einer großtechnischen Windstromerzeugung
Juli 2000, 242 Seiten, 15 €

- Band 72 H. Hermes
Analysen zur Umsetzung rationeller Energieanwendung in kleinen und mittleren Unternehmen des Kleinverbrauchersektors
 Juli 2000, 188 Seiten, 15 €
- Band 71 C. Schaefer, C. Weber, H. Voss-Uhlenbrock, A. Schuler, F. Oosterhuis, E. Nieuwlaar, R. Angioletti, E. Kjellsson, S. Leth-Petersen, M. Togeby, J. Munksgaard
Effective Policy Instruments for Energy Efficiency in Residential Space Heating - an International Empirical Analysis (EPISODE)
 Juni 2000, 146 Seiten, 13 €
- Band 70 U. Fahl, J. Baur, I. Ellersdorfer, D. Herrmann, C. Hoeck, U. Remme, H. Specht, T. Steidle, A. Stuible, A. Voß
Energieverbrauchsprognose für Bayern
 Mai 2000, 240 Seiten, 15 €
 Kurzfassung, 46 Seiten, 5 €
- Band 69 J. Baur
Verfahren zur Bestimmung optimaler Versorgungsstrukturen für die Elektrifizierung ländlicher Gebiete in Entwicklungsländern
 Mai 2000, 154 Seiten, 13 €
- Band 68 G. Weinrebe
Technische, ökologische und ökonomische Analyse von solarthermischen Turmkraftwerken
 April 2000, 212 Seiten, 15 €
- Band 67 C.-O. Wene, A. Voß, T. Fried (eds.)
Experience Curves for Policy Making - The Case of Energy Technologies
 April 2000, 282 Seiten, 18 €
- Band 66 A. Schuler
Entwicklung eines Modells zur Analyse des Endenergieeinsatzes in Baden-Württemberg
 März 2000, 236 Seiten, 15 €
- Band 65 A. Schäfer
Reduction of CO₂-Emissions in the Global Transportation Sector
 März 2000, 290 Seiten, 18 €
- Band 64 A. Freibauer, M. Kaltschmitt (eds.)
Biogenic Emissions of Greenhouse Gases Caused by Arable and Animal Agriculture - Processes, Inventories, Mitigation -
 März 2000, 148 Seiten, 13 €

- Band 63 A. Heinz, R. Stülpnagel, M. Kaltschmitt, K. Scheffer, D. Jeziarska
Feucht- und Trockengutlinien zur Energiegewinnung aus biogenen Festbrennstoffen. Vergleich anhand von Energie- und Emissionsbilanzen sowie anhand der Kosten
 Dezember 1999, 308 Seiten, 20 €
- Band 62 U. Fahl, M. Blesl, D. Herrmann, C. Kemfert, U. Remme, H. Specht, A. Voß
Bedeutung der Kernenergie für die Energiewirtschaft in Baden-Württemberg - Auswirkungen eines Kernenergieausstiegs
 November 1999, 146 Seiten, 13 €
- Band 61 A. Greßmann, M. Sawillion, W. Krewitt, R. Friedrich
Vergleich der externen Effekte von KWK-Anlagen mit Anlagen zur getrennten Erzeugung von Strom und Wärme
 September 1999, 138 Seiten, 10 €
- Band 60 R. Lux
Auswirkungen fluktuierender Einspeisung auf die Stromerzeugung konventioneller Kraftwerkssysteme
 September 1999, 162 Seiten, 13 € (*z. Zt. vergriffen*)
- Band 59 M. Kayser
Energetische Nutzung hydrothermalen Erdwärmevorkommen in Deutschland - Eine energiewirtschaftliche Analyse -
 Juli 1999, 184 Seiten, 15 € (*z. Zt. vergriffen*)
- Band 58 C. John
Emissionen von Luftverunreinigungen aus dem Straßenverkehr in hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung - Untersuchung von Emissions-szenarien am Beispiel Baden-Württembergs
 Juni 1999, 214 Seiten, 15 €
- Band 57 T. Stelzer
Biokraftstoffe im Vergleich zu konventionellen Kraftstoffen - Lebensweg-analysen von Umweltwirkungen
 Mai 1999, 212 Seiten, 15 € (*z. Zt. vergriffen*)
- Band 56 R. Lux, J. Sontow, A. Voß
Systemtechnische Analyse der Auswirkungen einer windtechnischen Stromerzeugung auf den konventionellen Kraftwerkspark
 Mai 1999, 322 Seiten, 20 € (*z. Zt. vergriffen*)
 Kurzfassung, 48 Seiten, 5 €
- Band 55 B. Biffar
Messung und Synthese von Wärmelastgängen in der Energieanalyse
 Mai 1999, 236 Seiten, 15 €

- Band 54 E. Fleißner
Statistische Methoden der Energiebedarfsanalyse im Kleinverbrauchersektor
Januar 1999, 306 Seiten, 20 €
- Band 53 A. Freibauer, M. Kaltschmitt (Hrsg.)
Approaches to Greenhouse Gas Inventories of Biogenic Sources in Agriculture
Januar 1999, 252 Seiten, 18 €
- Band 52 J. Haug, B. Gebhardt, C. Weber, M. van Wees, U. Fahl, J. Adnot, L. Cauret, A. Pierru, F. Lantz, J.-W. Bode, J. Vis, A. van Wijk, D. Staniaszek, Z. Zavody
Evaluation and Comparison of Utility's and Governmental DSM-Programmes for the Promotion of Condensing Boilers
Oktober 1998, 156 Seiten, 13 €
- Band 51 M. Blesl, A. Schweiker, C. Schlenzig
Erweiterung der Analysemöglichkeiten von *NetWork* - Der Netzwerkeditor
September 1998, 112 Seiten, 10 €
- Band 50 S. Becher
Biogene Festbrennstoffe als Substitut für fossile Brennstoffe - Energie- und Emissionsbilanzen
Juli 1998, 200 Seiten, 15 €
- Band 49 P. Schaumann, M. Blesl, C. Böhringer, U. Fahl, R. Kühner, E. Läge, S. Molt, C. Schlenzig, A. Stuible, A. Voß
Einbindung des ECOLOG-Modells '*E³Net*' und Integration neuer methodischer Ansätze in das *IKARUS*-Instrumentarium (*ECOLOG II*)
Juli 1998, 110 Seiten, 10 €
- Band 48 G. Poltermann, S. Berret
ISO 14000ff und Öko-Audit - Methodik und Umsetzung
März 1998, 184 Seiten, 15 €
- Band 47 C. Schlenzig
PlaNet: Ein entscheidungsunterstützendes System für die Energie- und Umweltplanung
Januar 1998, 230 Seiten, 15 €
- Band 46 R. Friedrich, P. Bickel, W. Krewitt (Hrsg.)
External Costs of Transport
April 1998, 144 Seiten, 13 €
- Band 45 H.-D. Hermes, E. Thöne, A. Voß, H. Despretz, G. Weimann, G. Kamelander, C. Ureta
Tools for the Dissemination and Realization of Rational Use of Energy in Small and Medium Enterprises
Januar 1998, 352 Seiten, 20 €

- Band 44 C. Weber, A. Schuler, B. Gebhardt, H.-D. Hermes, U. Fahl, A. Voß
Grundlagenuntersuchungen zum Energiebedarf und seinen Bestimmungsfaktoren
 Dezember 1997, 186 Seiten, 15 €
- Band 43 J. Albiger
Integrierte Ressourcenplanung in der Energiewirtschaft mit Ansätzen aus der Kraftwerkseinsatzplanung
 November 1997, 168 Seiten, 13 €
- Band 42 P. Berner
Maßnahmen zur Minderung der Emissionen flüchtiger organischer Verbindungen aus der Lackanwendung - Vergleich zwischen Abluftreinigung und primären Maßnahmen am Beispiel Baden-Württembergs
 November 1997, 238 Seiten, 15 €
- Band 41 J. Haug, M. Sawillion, U. Fahl, A. Voß, R. Werner, K. Weiß, J. Rösch, W. Wölfe
Analysis of Impediments to the Rational Use of Energy in the Public Sector and Implementation of Third Party Financing Strategies to improve Energy Efficiency
 August 1997, 122 Seiten, 10 €
- Band 40 U. Fahl, R. Krüger, E. Läge, W. Rüdfler, P. Schaumann, A. Voß
Kostenvergleich verschiedener CO₂-Minderungsmaßnahmen in der Bundesrepublik Deutschland
 August 1997, 156 Seiten, 13 €
- Band 39 M. Sawillion, B. Biffar, K. Hufendiek, R. Lux, E. Thöne
MOSAİK - Ein EDV-Instrument zur Energieberatung von Gewerbe und mittelständischer Industrie
 Juli 1997, 172 Seiten, 13 €
- Band 38 M. Kaltschmitt
Systemtechnische und energiewirtschaftliche Analyse der Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland
 April 1997, 108 Seiten, 10 €
- Band 37 C. Böhringer, T. Rutherford, A. Pahlke, U. Fahl, A. Voß
Volkswirtschaftliche Effekte einer Umstrukturierung des deutschen Steuersystems unter besonderer Berücksichtigung von Umweltsteuern
 März 1997, 82 Seiten, 8 €
- Band 36 P. Schaumann
Klimaverträgliche Wege der Entwicklung der deutschen Strom- und Fernwärmeversorgung - Systemanalyse mit einem regionalisierten Energiemodell -
 Januar 1997, 282 Seiten, 18 €

- Band 35 R. Kühner
Ein verallgemeinertes Schema zur Bildung mathematischer Modelle energiewirtschaftlicher Systeme
Dezember 1996, 262 Seiten, 18 €
- Band 34 U. Fahl, P. Schaumann
Energie und Klima als Optimierungsproblem am Beispiel Niedersachsen
November 1996, 124 Seiten, 10 €
- Band 33 W. Krewitt
Quantifizierung und Vergleich der Gesundheitsrisiken verschiedener Stromerzeugungssysteme
November 1996, 196 Seiten, 15 €
- Band 32 C. Weber, B. Gebhardt, A. Schuler, T. Schulze, U. Fahl, A. Voß, A. Perrels, W. van Arkel, W. Pellekaan, M. O'Connor, E. Schenk, G. Ryan
Consumers' Lifestyles and Pollutant Emissions
September 1996, 118 Seiten, 10 €
- Band 31 W. Rüffler, A. Schuler, U. Fahl, H.W. Balandynowicz, A. Voß
Szenariorechnungen für das Projekt *Klimaverträgliche Energieversorgung in Baden-Württemberg*
Juli 1996, 140 Seiten, 13 €
- Band 30 C. Weber, B. Gebhardt, A. Schuler, U. Fahl, A. Voß
Energy Consumption and Air-Borne Emissions in a Consumer Perspective
September 1996, 264 Seiten, 18 €
- Band 29 M. Hanselmann
Entwicklung eines Programmsystems zur Optimierung der Fahrweise von Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen
August 1996, 138 Seiten, 13 €
- Band 28 G. Schmid
Die technisch-ökonomische Bewertung von Emissionsminderungsstrategien mit Hilfe von Energiemodellen
August 1996, 184 Seiten, 15 €
- Band 27 A. Obermeier, J. Seier, C. John, P. Berner, R. Friedrich
TRACT: Erstellung einer Emissionsdatenbasis für TRACT
August 1996, 172 Seiten, 13 €
- Band 26 T. Hellwig
OMNIUM - Ein Verfahren zur Optimierung der Abwärmenutzung in Industriebetrieben
Mai 1998, 118 Seiten, 10 €

- Band 25 R. Laing
CAREAIR - ein EDV-gestütztes Instrumentarium zur Untersuchung von Emissionsminderungsstrategien für Dritte-Welt-Länder dargestellt am Beispiel Nigerias
Februar 1996, 221 Seiten, 20 €
- Band 24 P. Mayerhofer, W. Krewitt, A. Trukenmüller, A. Greßmann, P. Bickel, R. Friedrich
Externe Kosten der Energieversorgung
März 1996, Kurzfassung, 40 Seiten, 3 €
- Band 23 M. Blesl, C. Schlenzig, T. Steidle, A. Voß
Entwicklung eines Energieinformationssystems
März 1996, 76 Seiten, 3 €
- Band 22 M. Kaltschmitt, A. Voß
Integration einer Stromerzeugung aus Windkraft und Solarstrahlung in den konventionellen Kraftwerksverbund
Juni 1995, Kurzfassung, 51 Seiten, 3 €
- Band 21 U. Fahl, E. Läge, W. Rüffler, P. Schaumann, C. Böhringer, R. Krüger, A. Voß
Emissionsminderung von energiebedingten klimarelevanten Spurengasen in der Bundesrepublik Deutschland und in Baden-Württemberg
September 1995, 454 Seiten, 26 €
Kurzfassung, 48 Seiten, 3 €
- Band 20 M. Fishedick
Erneuerbare Energien und Blockheizkraftwerke im Kraftwerksverbund - Technische Effekte, Kosten, Emissionen
Dezember 1995, 196 Seiten, 15 €
- Band 19 A. Obermeier
Ermittlung und Analyse von Emissionen flüchtiger organischer Verbindungen in Baden-Württemberg
Mai 1995, 208 Seiten, 15 €
- Band 18 N. Kalume
Strukturmodule - Ein methodischer Ansatz zur Analyse von Energiesystemen in Entwicklungsländern
Dezember 1994, 113 Seiten, 10 €
- Band 17 Th. Müller
Ermittlung der SO₂- und NO_x-Emissionen aus stationären Feuerungsanlagen in Baden-Württemberg in hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung
November 1994, 142 Seiten, 10 €

- Band 16 A. Wiese
Simulation und Analyse einer Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien in Deutschland
Juni 1994, 223 Seiten, 15 €
- Band 15 M. Sawillion, T. Hellwig, B. Biffar, R. Schelle, E. Thöne
Optimierung der Energieversorgung eines Industrieunternehmens unter Umweltschutz- und Wirtschaftlichkeitsaspekten - Wertanalyse-Projekt
Januar 1994, 154 Seiten, 13 €
- Band 14 M. Heymann, A. Trukenmüller, R. Friedrich
Development prospects for emission inventories and atmospheric transport and chemistry models
November 1993, 105 Seiten, 10 €
- Band 13 R. Friedrich
Ansatz zur Ermittlung optimaler Strategien zur Minderung von Luftschadstoffemissionen aus Energieumwandlungsprozessen
Juli 1992, 292 Seiten, 18 €
- Band 12 U. Fahl, M. Fishedick, M. Hanselmann, M. Kaltschmitt, A. Voß
Abschätzung der technischen und wirtschaftlichen Minderungspotentiale energiebedingter CO₂-Emissionen durch einen verstärkten Erdgaseinsatz in der Elektrizitätsversorgung Baden-Württembergs unter besonderer Berücksichtigung konkurrierender Nutzungsmöglichkeiten
August 1992, 471 Seiten, 26 €
Kurzfassung, 45 Seiten, 5 €
- Band 11 M. Kaltschmitt, A. Wiese
Potentiale und Kosten regenerativer Energieträger in Baden-Württemberg
April 1992, 320 Seiten, 20 €
- Band 10 A. Reuter
Entwicklung und Anwendung eines mikrocomputergestützten Energieplanungsinstrumentariums für den Einsatz in Entwicklungsländern
November 1991, 170 Seiten, 13 €
- Band 9 T. Kohler
Einsatzmöglichkeiten für Heizreaktoren im Energiesystem der Bundesrepublik Deutschland
Juli 1991, 162 Seiten, 13 €
- Band 8 M. Mattis
Kosten und Auswirkungen von Maßnahmen zur Minderung der SO₂- und NO_x-Emissionen aus Feuerungsanlagen in Baden-Württemberg
Juni 1991, 188 Seiten, 13 €

- Band 7 M. Kaltschmitt
Möglichkeiten und Grenzen einer Stromerzeugung aus Windkraft und Solarstrahlung am Beispiel Baden-Württembergs
Dezember 1990, 178 Seiten, 13 €
- Band 6 G. Schmid, A. Voß, H.W. Balandynowicz, J. Cofala, Z. Parczewski
Air Pollution Control Strategies - A Comparative Analysis for Poland and the Federal Republic of Germany
Juli 1990, 92 Seiten, 8 €
- Band 5 Th. Müller, B. Boysen, U. Fahl, R. Friedrich, M. Kaltschmitt, R. Laing, A. Voß, J. Giesecke, K. Jorde, C. Voigt
Regionale Energie- und Umweltanalyse für die Region Neckar-Alb
Juli 1990, 484 Seiten, 28 €
- Band 4 Th. Müller, B. Boysen, U. Fahl, R. Friedrich, M. Kaltschmitt, R. Laing, A. Voß, J. Giesecke, K. Jorde, C. Voigt
Regionale Energie- und Umweltanalyse für die Region Hochrhein-Bodensee
Juni 1990, 498 Seiten, 28 €
- Band 3 D. Kluck
Einsatzoptimierung von Kraftwerkssystemen mit Kraft-Wärme-Kopplung
Mai 1990, 155 Seiten, 10 €
- Band 2 M. Fleischhauer, R. Friedrich, S. Häring, A. Haugg, J. Müller, A. Reuter, A. Voß, H.-G. Wystrcil
Grundlagen zur Abschätzung und Bewertung der von Kohlekraftwerken ausgehenden Umweltbelastungen in Entwicklungsländern
Mai 1990, 316 Seiten, 20 €
- Band 1 U. Fahl
KDS - Ein System zur Entscheidungsunterstützung in Energiewirtschaft und Energiepolitik
März 1990, 265 Seiten, 18 €

