

Stefan Bringezu  
Thomas Hanke  
Helmut Schütz  
Ole Soukup  
Peter Viebahn  
Manfred Fishedick (AP-Leitung)

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH

## Indikatoren / Bottom-up-Modelle und Szenarien

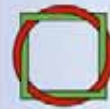
### Zusammenfassung

Zusammenfassung der Ergebnisse des Arbeitspakets 6 des Projekts „Materialeffizienz und Ressourcenschonung“ (MaRes)



Wuppertal, Dezember 2010

ISSN 1867-0237



**Wuppertal Institut**  
für Klima, Umwelt, Energie  
GmbH

#### Kontakt zu den Autor(inn)en:

Dr. Stefan Bringezu (für AS6.1)

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH  
Döppersberg 19, 42103 Wuppertal

Tel.: +49 (0) 202 2492 -131, Fax: -138

Mail: [stefan.bringezu@wupperinst.org](mailto:stefan.bringezu@wupperinst.org)

Dr. Peter Viebahn (für AS6.2)

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH  
Döppersberg 19, 42103 Wuppertal

Tel.: +49 (0) 202 2492 -306, Fax: -198

Mail: [peter.viebahn@wupperinst.org](mailto:peter.viebahn@wupperinst.org)

### „Materialeffizienz und Ressourcenschonung“ (MaRes) – Projekt im Auftrag des BMU | UBA

**Projektlaufzeit:** 07/2007 – 12/2010

#### Projektleitung:

Dr. Kora Kristof / Prof. Dr. Peter Hennicke

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH  
42103 Wuppertal, Döppersberg 19

Tel.: +49 (0) 202 2492 -183 / -136, Fax: -198 / -145

Mail: [kora.kristof@wupperinst.org](mailto:kora.kristof@wupperinst.org)

[peter.hennicke@wupperinst.org](mailto:peter.hennicke@wupperinst.org)

© Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH

Weitere Informationen zum Projekt

„Materialeffizienz und Ressourcenschonung“ (MaRes)

finden Sie unter [www.ressourcen.wupperinst.org](http://www.ressourcen.wupperinst.org)

#### Wuppertal Institut in Kooperation mit

BASF

Borderstep

CSCP

Daimler

demea – VDI / VDE-IT

ECN

EFA NRW

FhG IAO

FhG UMSICHT

FU Berlin

GoYa!

GWS

Hochschule Pforzheim

IFEU

Institut für Verbraucherjournalismus

IÖW

IZT

MediaCompany

Ökopol

RWTH Aachen

SRH Hochschule Calw

Stiftung Warentest

ThyssenKrupp

Trifolium

TU Berlin

TU Darmstadt

TU Dresden

Universität Kassel

Universität Lüneburg

ZEW

Gefördert wird das Vorhaben im Rahmen des UFOPLAN  
durch das BMU und das UBA, Förderkennzeichen: 3707 93 300

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung  
liegt bei den Autor(inn)en.



Bundesministerium  
für Umwelt, Naturschutz  
und Reaktorsicherheit

Umwelt  
Bundes  
Amt   
Für Mensch und Umwelt

## Indikatoren / Bottom-up-Modelle und Szenarien

### Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b>	<b>3</b>
<b>TEIL I – Abschlussbericht des Arbeitsschritts 6.1</b>	<b>5</b>
<b>TEIL II – Abschlussbericht des Arbeitsschritts 6.2</b>	<b>7</b>
<b>1 Modellkonzept</b>	<b>7</b>
1.1 Ziele und Aufgabenstellung	7
1.2 Das Bedarfsfeld „Warmer Wohnraum“ als Teil des Bedarfsfelds „Bauen und Wohnen“	8
1.3 Das Bottom-up Wirkungsanalyse Modell „Warmer Wohnraum“	9
<b>2 Definition und Implementierung der MaRes-Szenarien</b>	<b>12</b>
2.1 Ausgangspunkt Policymix	12
2.2 Narrative Beschreibung der MaRes-Szenarien	14
2.3 Detaillierung der Szenarien-Eingriffe auf der Nachfrageseite und deren Treibergrößen in <i>HEAT</i>	15
<b>3 Modellierungsergebnisse und Schlussfolgerungen</b>	<b>16</b>
<b>4 Politikempfehlungen und Forschungsbedarf</b>	<b>23</b>
<b>5 Literatur</b>	<b>27</b>

## Abbildungen

Abb. 1:	Modellkonzept für das Bedarfsfeld „Warmer Wohnraum“	10
Abb. 2:	Kumulierter Einsatz von Dämmstoffen (XPS und Zellulose) in den MaRess- Szenarien <i>MaRess BAU</i> , <i>MaRess Leit-Minus</i> , <i>MaRess Leit</i> und <i>MaRess Leit-Plus</i>	17
Abb. 3:	Vergleich der Endenergienachfrage in den MaRess-Szenarien <i>BAU</i> , <i>Leit-Minus</i> , <i>Leit</i> und <i>Leit-Plus</i> für Raumwärme und Warmwasser bis zum Jahr 2050	18
Abb. 4:	Relative Entwicklung von Umweltwirkungs-Indikatoren im Szenario <i>MaRess Leit-Plus</i>	19
Abb. 5:	Absolute Entwicklung des Umweltwirkungs-Indikators „Erschöpfung abiotischer Ressourcen“ im Szenario <i>MaRess Leit-Plus</i>	20
Abb. 6:	Relative Entwicklung von CML-Indikatoren im Szenario <i>MaRess Leit-Plus</i> ( <i>Sensitivität Treibmittel</i> ) – Werte zwischen 250 und 500% abgeschnitten	21
Abb. 7:	Ergebnisse der Trade-off Analyse (Ressourceneinsatz versus Einsparungen) der Dämmstoffvarianten XPS und Zellulose	22

## Tabellen

Tab. 1:	Zusammenfassende Darstellung der Einflussgrößen im Gebäudebereich nach Szenarien	15
---------	----------------------------------------------------------------------------------	----

## **Vorwort**

Dieser Bericht gliedert sich in zwei Teile:

### **Teil I: Materialflussindikatoren als Basis zur Messung von Ressourcenproduktivität und Umweltwirkungen**

In Teil I werden die Ergebnisse des Arbeitsschritts 6.1 dargestellt.

### **Teil II: Bottom-Up Wirkungsanalyse-Modell**

In Teil II werden die Ergebnisse des Arbeitsschritts 6.2 dargestellt.



## TEIL I – Abschlussbericht des Arbeitsschritts 6.1

### Materialflussindikatoren als Basis zur Messung von Ressourcenproduktivität und Umweltwirkungen

Autoren: Stefan Bringezu, Helmut Schütz

#### Zusammenfassung

Die Bundesregierung beabsichtigte, die Anwendung von Makroindikatoren zur Messung des Ressourcenverbrauchs der deutschen Wirtschaft zu untersuchen, und erwartete Vorschläge zur weitergehenden Anwendung und Entwicklung. Im erweiterten Kontext steht dies in Verbindung zur Entwicklung eines nationalen Programms für nachhaltiges Ressourcenmanagement wie es zum Beispiel durch die Thematische Strategie der EU zur nachhaltigen Nutzung natürlicher Ressourcen gefordert wird. Im Besonderen sollte das bestehende Instrumentarium zur Beobachtung des Fortschrittes hin zu Nachhaltigkeit im Sinne der nationalen Nachhaltigkeitsstrategie verbessert werden, indem der Gültigkeitsbereich des bisher verwendeten Rohstoffindikators zu erweitern wäre.

Die Konzepte der Materialflussrechnung von EUROSTAT und OECD beinhalten eine schrittweise Erweiterung der Indikatoren für Ressourcennutzung und Ressourcenproduktivität. Direkter Material Input (*englisch: Direct Material Input - DMI*) und Inländischer Materialverbrauch (*englisch: Domestic Material Consumption - DMC*) bilden die Basis, sie erfassen jedoch nicht die indirekten Materialflüsse von Importen und Exporten, und auch nicht die ungenutzte Extraktion im Inland. So werden die ausländische Dimension und der volle Umfang der Primärmaterialentnahme nicht abgebildet. DMI und DMC können in Rohstoffäquivalenten (*englisch: Raw Material Equivalents - RME*) berechnet werden, welche die indirekten Materialflüsse in Form genutzter Rohstoffentnahme einschließt und damit die nicht genutzte Extraktion außen vor lässt. Die umfassendsten Indikatoren für den gesamten globalen Primärmaterialbedarf für Produktion und Verbrauch, welche sowohl die genutzte als auch die nicht genutzte Extraktion umfassen, sind der Globale (Gesamt-)Material Aufwand (*englisch: Total Material Requirement - TMR*) und der Globale (Gesamt-)Material Verbrauch (*englisch: Total Material Consumption - TMC*).

Darüber hinaus beabsichtigt die Europäische Kommission Indikatoren zu entwickeln, welche die mit Ressourcennutzung verbundenen Umweltwirkungen abbilden, um so Fortschritte zur doppelten Entkopplung (*englisch: double-decoupling*) zu erfassen, die zentrales Thema der Thematischen Strategie zur nachhaltigen Nutzung natürlicher Ressourcen ist.

Der Workshop brachte Experten und Repräsentanten von Datennutzern, Datenanbieter aus der Forschung und Statistische Ämter zusammen. Verschiedene Ansätze und

Positionen wurden hervorgehoben und hinsichtlich grundlegender methodischer Fragestellungen und Interpretierbarkeit der abgeleiteten Indikatoren diskutiert. Eine „mind-map“ Übung arbeitete grundlegende Anforderungen an einen idealen Indikator für Ressourcennutzung aus der Sicht von Anwendern, Anbietern oder Statistikern heraus. Eine interaktive Einheit über Anforderungen für das offizielle Berichtssystem in Deutschland und seinen Verbesserungsbedarf richtete das Hauptaugenmerk weiterführend auf das Interesse der Bundesregierung, wie mit der Erfassung von Ressourcennutzung und Ressourcenproduktivität weiter umgegangen werden sollte.

Unter den Nutzern von Daten und Indikatoren war die allgemeine Tendenz, RME im ersten Schritt zu entwickeln und im Folgenden TMR/TMC welche als umfassendste Indikatoren angesehen wurden. Auch Wirkungsbezogene Indikatoren erhielten die Aufmerksamkeit der Anwender. Es gab jedoch keine eindeutige Haltung, den gegenwärtigen Leitindikator kurzfristig zu ersetzen.

Datenanbieter aus der Forschung unterstützten ihren jeweiligen Schwerpunkt der Indikatorenentwicklung, mit einer generellen Tendenz – wie bei den Anwendern – zunächst den RME zu entwickeln und in der Folge TMR/TMC, indem einer modularen Vorgehensweise zu folgen wäre wonach die nicht genutzte Extraktion zum RME hinzugefügt wird, während man weiterer Forschung zu wirkungsbezogenen Indikatoren offen gegenüber stünde.

Statistiker favorisierten RME und zeigten Interesse sowohl für TMR/TMC als auch für die wirkungsbezogenen Indikatoren für Ressourcennutzung.

Darüber hinaus wurden einige kritische offene Fragestellungen zur konzeptionellen Fundierung der verschiedenen Indikatoren identifiziert, die weiterer Diskussion und Harmonisierung bedürfen.



## TEIL II – Abschlussbericht des Arbeitsschritts 6.2

### Bottom-up Wirkungsanalyse-Modell

Autoren: Thomas Hanke, Ole Soukup, Peter Viebahn, Manfred Fishedick

## 1 Modellkonzept

### 1.1 Ziele und Aufgabenstellung

Ziel des Arbeitsschrittes 6.2 war es, am Beispiel eines ausgewählten Bedarfsfeldes beispielhaft zu analysieren, wie sich Politikansätze zur Erhöhung der Ressourceneffizienz in der Summe auf die Ressourcenbilanz auswirken und mit welchem Erfolg sie umgesetzt werden könnten. Dies beinhaltet drei Untersuchungsebenen:

- Durch die Entwicklung und beispielhafte Anwendung eines *Bottom-up Wirkungsanalyse Modells* sollte es ermöglicht werden, sowohl die direkten als auch die indirekten Wirkungen eines von den Arbeitspaketen 3 (Innovative Ressourcenpolitikansätze zur Gestaltung der Rahmenbedingungen), 4 (Innovative Ressourcenpolitikansätze auf Mikroebene: Unternehmensnahe Instrumente und Ansatzpunkte) und 12 (Konsumenten- und kundennahe Ansätze zur Ressourceneffizienzsteigerung) identifizierten Policymixes zu ermitteln, also quasi eine „Netto“-Bilanzierung der aus verschiedenen Politikansätzen resultierenden Ressourcenströme durchzuführen. Auf diese Weise können sowohl direkte Wechselwirkungen als auch Trade-offs und Synergieeffekte zwischen betrachteten Maßnahmen ermittelt werden.
- Neben den Auswirkungen auf den Ressourcenbereich selbst sollten gleichzeitig auch Wechselwirkungen mit anderen gesellschaftspolitischen Zielen (insbesondere den Klimaschutzzielen) analysiert werden. So ist angesichts klimapolitischer Vorgaben in Deutschland und der Europäischen Union zu fragen, ob Maßnahmen zur Verringerung der Ressourcenströme im Einklang mit den Reduktionszielen für Treibhausgas-Emissionen stehen. Weitere emissionsseitige Umweltwirkungsbereiche sind zum Beispiel der Sommersmog, die Versauerung von Böden und Gewässern oder die Belastung durch Feinstäube, die mithilfe eines *Ökobilanzierungs-Modells* ermittelt werden können.
- Durch die Anwendung und Übertragung der im Energiesektor gängigen Szenarioanalyse wurde es zudem möglich, die Auswirkungen verschiedener Ressourcenpolitikansätze im gleichen Bedarfsfeld zu modellieren und ihre Auswirkungen und Unterschiede gegenüberzustellen. Indem gleichzeitig nicht nur die Ist-Situation, sondern die Entwicklung auf der Zeitachse bis zum Jahr 2050 modelliert wurde, konnten zudem *Langfrist-Auswirkungen* analysiert werden. Dies ist insbesondere dann relevant, wenn die Auswirkungen von Ressourceneffizienzmaßnahmen einen Zeitraum von mehreren Jahrzehnten betreffen.

Die Erfahrungen bei der Modellierung des ausgewählten Bedarfsfeldes und der entwickelten Methodik sollten schließlich hinsichtlich ihrer Übertragbarkeit auf andere Bedarfsfelder analysiert werden. Dieser Teil der Analyse ist Inhalt des Papers 6.1 „Übertragbarkeit des Bottom-up Wirkungsanalyse-Modells auf andere Bedarfsfelder“. Es zeigt, dass das hier entwickelte Modell unter zwei Voraussetzungen auf andere Bedarfsfelder übertragbar ist: Einerseits müssen messbare Indikatoren zur Verfügung stehen, mit denen die Wirkung von Politikinstrumenten abgebildet werden kann; andererseits muss für das jeweilige Bedarfsfeld ein Technikmodell einsatzbereit sein, mit dem Veränderungen der gewählten Indikatoren im Zeitablauf szenarienmäßig berechnet werden können. Dies ist beispielsweise im Bedarfsfeld „Mobilität und Verkehr“ mit dem TREMOD-Modell gegeben, das im Auftrag des Umweltbundesamtes durch das Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg (ifeu) entwickelt wurde (vgl. ifeu 2010).

## **1.2 Das Bedarfsfeld „Warmer Wohnraum“ als Teil des Bedarfsfelds „Bauen und Wohnen“**

Von verschiedenen in Frage kommenden Bedarfsfeldern wurde das Bedarfsfeld „Bauen und Wohnen“ und hierin das Teil-Bedarfsfeld „Warmer Wohnraum“ ausgewählt. Dieses Bedarfsfeld umfasst nach der hier vorgenommenen Definition die Nachfrage nach „Warmem Wohnraum“ in Deutschland. „Warmer Wohnraum“ kann mittels Heizungsanlagen auf fossiler und erneuerbarer Basis, mittels Stromheizung über fossilen Strom oder erneuerbare Energien oder auch durch energetische Optimierung (zum Beispiel Wärmedämmung) von Gebäuden erreicht werden. Neben dem Bestand an Wohnungen werden auch die Zu- und Abgänge bis zum Jahr 2050 betrachtet.

Für die Auswahl dieses Bedarfsfeldes waren verschiedene Gründe ausschlaggebend:

- Das Bedarfsfeld „Bauen und Wohnen“ ist hinsichtlich des direkten und indirekten globalen Materialaufwandes der inländischen sektoralen Produktion ein Hot-Spot Bereich (Acosta-Fernandez et al. 2009). Analysiert man zudem den Verbrauch der energetischen Ressourcen, so zeigt sich die herausragende Bedeutung des Bedarfsfeldes „Warmer Wohnraum“.
- Trotz der hohen Bedeutung des Gebäudebereichs für die Ressourcenfrage sind Effizienzstrategien dagegen bisher eher rudimentär behandelt worden, so dass hier erstmals Energieeinsparstrategien und die dadurch ausgelöste Nachfrage nach Dämmstoffen gegenüber gestellt werden können.
- Maßnahmen zur Einsparung von Energie und Emissionen im Gebäudebereich gehen bisher implizit davon aus, dass keine negativen Trade-offs entstehen. Ob beispielsweise die Wirkung von Energiesparmaßnahmen möglicherweise durch die für die Herstellung der Dämmmaterialien benötigte Energie wieder aufgehoben wird, lässt sich in einer Überschlagsrechnung vergleichsweise einfach abschätzen. Welche Wechselwirkungen sich letztendlich aus energie- und prozessbedingten Emissionen in Hinblick auf unterschiedliche Umweltwirkungen ergeben, ist dagegen we-

niger offensichtlich und oft wesentlich von der Ausgestaltung der betrachteten Prozessketten abhängig. Durch die Kopplung eines Gebäude-Energiemodells mit einem Stoffstrommodell kann dies hier erstmals gezielt untersucht werden.

- Insbesondere durch den hohen Aufwand nicht-energetischer Ressourcen im Bedarfsfeld „Warmer Wohnraum“ ist zudem eine Analyse der Trade-offs zwischen eher energie- und emissions-getriebenen und stärker ressourceneffizienz-getriebenen Strategien interessant.
- Nicht zuletzt existiert für die in diesem Bereich relevanten Energieflüsse eine vom Wuppertal Institut entwickelte Bottom-up Methodik, die in dem stock-exchange Gebäudemodell *HEAT* umgesetzt wurde.

### **1.3 Das Bottom-up Wirkungsanalyse Modell „Warmer Wohnraum“**

Zur Umsetzung der oben dargestellten Ziele wurde das im Folgenden beschriebene Bottom-up Wirkungsanalyse Modell „Warmer Wohnraum“ entwickelt. Abb. 1 zeigt die verschiedenen Module, aus denen das Modell aufgebaut ist.

#### **Modul 1: Modellierung des Bedarfsfelds „Warmer Wohnraum“ mit *HEAT***

Das EDV-System *HEAT* (Household Energy and Appliances modelling Tool) dient der Energie- und Emissionsbilanzierung und dem -monitoring im Haushaltssektor und enthält neben einer differenzierten Haushaltsgeräteseite zur Ermittlung des Strombedarfes auf der Wärmeseite eine bauteilspezifische Modellierung des Gebäudebestands Deutschlands. Sie lässt sich an regionale und datentechnische Anforderungen anpassen und kann in ihrer größten Ausprägung 64 Gebäudetypen differenzieren.

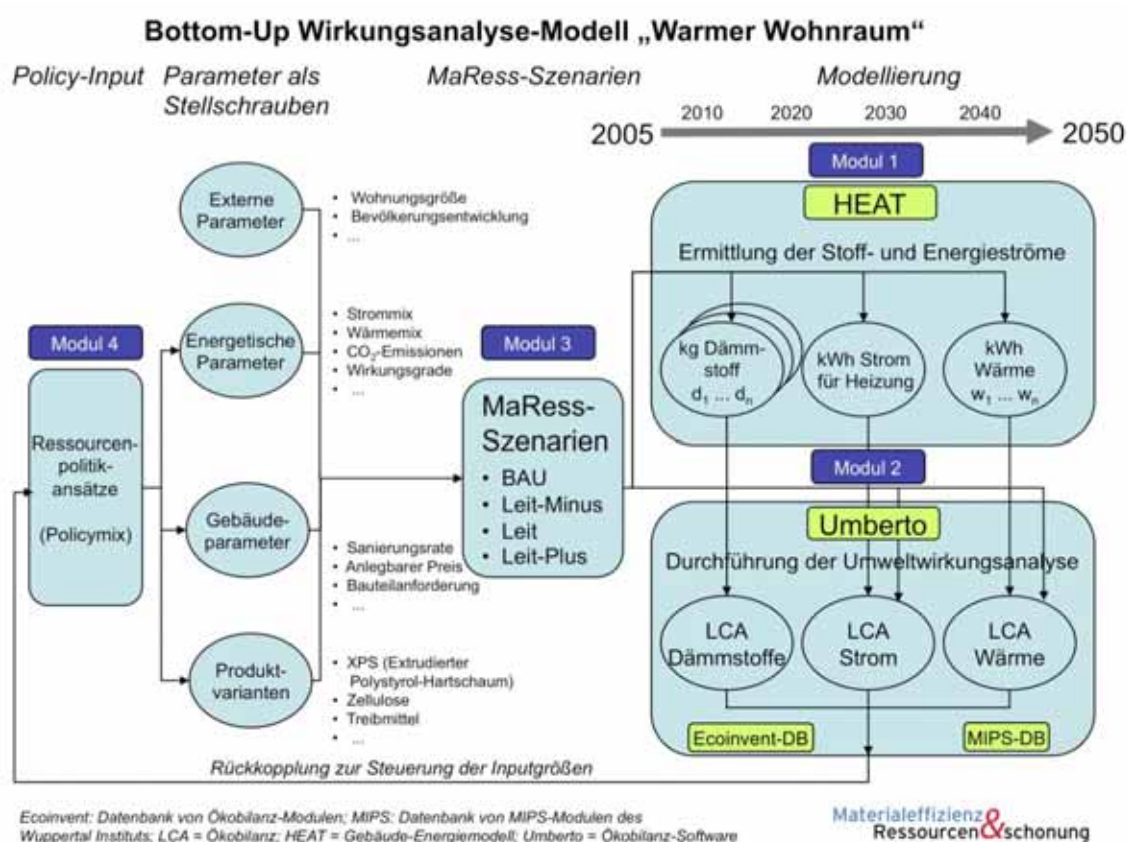
Innerhalb dieses Technologiemoells wird in einer Langfristbetrachtung bis zum Jahr 2050 für verschiedene Szenarien, die sich aus ressourcenpolitischen Vorgaben ableiten, die Entwicklung des Endenergiebedarfs für den Wohnungssektor modelliert, aufgeteilt nach Energiearten. Gleichzeitig wird die direkte Nachfrage nach Dämmstoffen ermittelt, wobei zum Beispiel bei der Berechnung von Dämmstoffmengen eine Auswertung der prognostizierten Anforderungen an Wärmedurchgangskoeffizienten von Gebäudehüllen erfolgt. Betrachtet wird der gesamte Gebäudebestand inklusive Zu- und Abgängen in Deutschland zu den jeweiligen Zeitpunkten 2005, 2010, 2020, 2030, 2040 und 2050.

#### **Modul 2: Umweltwirkungsanalyse**

Die mit *HEAT* berechneten Mengen aus jährlichem Zubau an Dämmstoffen und jährlichem Endenergie-Einsatz in Heizungssystemen im gesamten Gebäudebestand werden anschließend in Stoff- und Energieflussmodelle eingespeist, die mit der Software Umberto erstellt werden. Zur Ermittlung ihrer Umweltwirkungen werden Ökobilanzen in Anlehnung an (DIN 2006a,b) erstellt.

Die Bilanzergebnisse werden schließlich einer Umweltwirkungsabschätzung unterzogen, wodurch eine ökologische Gesamtbewertung von eingesetzten Materialien und Energiemengen an Hand verschiedener Umweltwirkungsindikatoren und unter Berücksichtigung der jeweiligen Bereitstellungsvorketten möglich wird. Verwendet wird die CML-Methode (Guinée et al. 2002:63ff), die über eine breite internationale Anwenderschaft verfügt und sich dadurch auszeichnet, dass sie eine Vielzahl unterschiedlicher Beeinflussungen verschiedener Umweltmedien abdeckt. Diese beinhalten Wirkungskategorien auf der Emissionsseite und auf der Inputseite.

Abb. 1: Modellkonzept für das Bedarfsfeld „Warmer Wohnraum“



Quelle: Eigene Entwicklung

*Emissionsseitig* werden bilanziert: Überdüngungspotenzial, Versauerungspotenzial, stratosphärischer Ozonabbau, sedimentäre Süßwasser-Ökotoxizität, sedimentäre Seewasser-Ökotoxizität, aquatische Süßwasser-Ökotoxizität, aquatische Seewasser-Ökotoxizität, Boden-Ökotoxizität, photochemische Oxidation (Sommersmog), Klimawandel, ionisierende Strahlung und Humantoxizitätspotenzial.

*Ressourcenseitig* werden bilanziert: *Erschöpfung abiotischer Ressourcen* und *Landverbrauch*. Der Ressourcenindikator erfasst die Extraktion von mineralischen Rohstoffen und fossilen Energieträgern. Auf Grundlage ihres Verhältnisses zwischen jährlicher Extraktion und Ressourcenpotenzial („Ultimate Reserves“) wird ihr Erschöpfungs-

tenzial ermittelt, und im Rahmen der Charakterisierung auf die Referenzressource Antimon umgerechnet.

Diese beiden ressourcenseitigen Indikatoren liefern Hinweise auf die Belastung von Energie-, Material- und Flächenressourcen durch das Produktsystem, wobei 284 Elementarflüsse der Kategorie „Ressource“ bilanziert werden. Das Erschöpfungspotenzial berücksichtigt jedoch nicht den Gesamtumfang abiotischer und biotischer Ressourcenentnahme. Hierzu bedarf es der zusätzlichen Erfassung des „ökologischen Rucksacks“ über die Indikatoren MIPS bzw. TMR (einer der Hauptkategorien von MIPS, der langfristig auch auf volkswirtschaftlicher Ebene als Schlüsselindikator von OECD, ESTAT und DESTATIS erhoben werden soll). Da derzeit jedoch keine konsistente Bilanzierung unter Einbezug sowohl von Ökobilanz-Indikatoren als auch von MIPS-Indikatoren möglich ist (siehe Forschungsbedarf in Kapitel 4), werden hier zunächst die Ökobilanz-Indikatoren verwendet. In einer Sensitivitätsanalyse werden an einem Fall ergänzend Materialintensitäten mit MIPS berechnet.

### **Modul 3: MaRess-Szenarien**

Die Modellierung innerhalb von HEAT und Umberto basiert auf der Definition und Ausgestaltung verschiedener „MaRess Szenarien“. Diese beschreiben – in einer Langfristspektive – mögliche Entwicklungspfade zur Reduzierung des Energiebedarfs (und damit energetischer Ressourcen) des privaten Gebäudesektors. Die Szenarien spannen einen Fächer zwischen niedriger und sehr hoher (politischer) Eingriffstiefe auf. Sie sind zunächst am Instrumentarium der Energiemodellierung orientiert, da hier jahrzehntelange Erfahrung und konkrete politische Vorgaben beziehungsweise Absichtserklärungen vorliegen (siehe Kapitel 2).

### **Modul 4: Policymix und Einflussparameter**

Treiber für die verschiedenen Szenarien sind entsprechende Einflussparameter, die sich durch den Policymix einer Ressourcenpolitik ergeben. Diese auch als Stellschrauben bezeichneten Größen bestimmen den Fächer an Szenarien, der eine Bandbreite möglicher Entwicklungen bis zum Jahr 2050 aufzeigt. Hierzu zählen

- *Externe Parameter:* Unter den allgemeinen betrachteten, nichtenergetischen Treibergrößen sind Rahmenindikatoren zusammengefasst, die eine allgemeine wirtschaftliche oder gesellschaftliche Entwicklung widerspiegeln und für alle Szenarien gleich gelten. Zu ihnen gehören etwa die demographische Entwicklung und die damit einhergehende Wohnflächenentwicklung, die Entwicklung der Bauteilstandards selbst (da die Güte der jeweiligen Standards innerhalb der Szenarien nicht variiert werden, sondern nur deren Marktanteile) sowie die Wirkungen von flankierenden Maßnahmen auf die Sanierungsraten.
- *Energetische Parameter:* Für alle MaRess-Szenarien wurden Annahmen zur Entwicklung des Strommixes und des Wärmemixes in den Stützjahren getroffen. Der jeweilige Strommix wird im Stoffstrommodell dem direkten Strombedarf der Herstellung von Dämmstoffen sowie der Nutzung von Strom zu Heizzwecken zu Grunde

gelegt. Der Wärmemix geht in die Bilanzierung der Herstellung von Wärme und Warmwasser in den Haushalten ein.

- *Gebäudeparameter*: Neben den Annahmen, die die Energieszenarien direkt betreffen, wurden für jedes Szenario weitere Annahmen zur Modellierung der jeweiligen Energieverbräuche im Wohnsektor getroffen wie etwa die zu erwartende Sanierungsrate im Gebäudebestand, Anforderungen an Bauteilbeschaffenheiten oder anlegbare Preise bezogen auf die Kosten von Sanierungsmaßnahmen.
- *Produktvarianten*: Als Sensitivitätsanalysen wurden eine Variation des Dämmstoffes sowie die Zusammensetzung der für die Herstellung des Dämmstoffs XPS benötigten Treibmittel modelliert. Generell können bei den Produktvarianten zukünftig in Produktionsprozessen zu erwartende Veränderungen (ausgelöst zum Beispiel durch technische Innovationen, durch Reduktion des Material- und Energieeinsatzes oder durch Substitution einzelner Produkte durch Ersatzstoffe) berücksichtigt werden.

Das Policymix-Modul 4 bekommt schließlich von Modul 2 über den zeitlichen Verlauf verschiedener Wirkungsindikatoren den Grad der Zielerreichung der ursprünglichen Politikansätze zurückgemeldet. Hierdurch wird es möglich, bei Verfehlen der Zielmarken die Politikansätze zu justieren und zu optimieren und die MaRes-Szenarien entsprechend anzupassen.

## 2 Definition und Implementierung der MaRes-Szenarien

### 2.1 Ausgangspunkt Policymix

#### Grundidee der geplanten Modellierung

Ursprüngliches Ziel der Szenarien-Modellierung war es, auf einem von den AP3, 4 und 12 identifizierten Policymix aufzusetzen und insbesondere ressourcenpolitische Maßnahmen in die Szenarien zu integrieren oder gezielt eigene Ressourcenszenarien zu entwickeln. Als methodische Grundlage stand dafür die aus der Energiemodellierung bewährte Vorgehensweise der Szenarienerstellung zur Verfügung. Deren zentrale Elemente sind

- *Zielorientierung*: Definieren eines Langfristziels, das sich aus einem oder mehreren Zielgrößen zusammen setzt – prominente Beispiele sind die seit Jahren erstellten Energieszenarien, die beispielsweise in der Variante E1 des Leitszenarios 2008 (BMU 2008) das Ziel einer 80-prozentigen Reduktion der energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen bis zum Jahr 2050 betrachten;
- *Szenarienfächer*: Entwickeln einer Schar von Langfrist-Szenarien, die Entwicklungspfade zum Erreichen der gesetzten Zielgrößen aufspannen oder zeigen, wie und in welchem Ausmaß die Ziele verfehlt werden. Solche Szenarien spannen

meist einen Fächer zwischen niedriger Eingriffstiefe (business-as-usual Pfad) und hoher Eingriffstiefe (mit Auswirkungen bis hin zum Systemwechsel) auf.

Zur Entwicklung von Politikinstrumenten fanden mehrere Abstimmungsgespräche und gemeinsame Workshops zwischen den Modellierungs-Arbeitspaketen 5 (Quantitative und qualitative Analyse der ökonomischen Effekte einer forcierten Ressourceneffizienzstrategie) und 6 sowie den Politik-AP3, 4 und 12 statt. Zusammenfassend kann jedoch keiner der von den Politik-AP identifizierten Ressourcenpolitik-Ansätze direkt auf den hier modellierten Bereich der Sanierung von Wohngebäuden angewendet werden. Die beiden einzigen als relevant identifizierten Instrumente wären die Baustoffbesteuerung (AP3) und der Ressourcenausweis für Gebäude (AP12) gewesen. Ersterer berücksichtigt jedoch nur Primärbaustoffe, während in AS6.2 Dämmstoffe modelliert werden; letzterer wurde aufgrund der großen Unsicherheit hinsichtlich der anzusetzenden Werte nicht weiter betrachtet. Es wurde deutlich, dass hinsichtlich der Verbindung der Szenarientwicklung und der Stoffstrommodellierung mit der Konkretisierung von wohnraumspezifischen Instrumenten weiterer Forschungsbedarf besteht.

Aber selbst wenn quantifizierbare Instrumente vorlägen, bestände aus technischer Sicht die Herausforderung, sie in Stoffstrommodellen modellieren zu können. Die Integration von Ressourcenindikatoren in Ökobilanzen stellt wie oben beschrieben einen weiteren wichtigen Forschungsansatz dar.

### **Alternativ gewählter Modellierungsansatz**

Aufgrund der Schwierigkeiten, konkrete Ressourcenziele und Instrumente zu deren Erreichbarkeit zu definieren, wurde der Rückgriff auf bestehende klimapolitische Ziele und Szenarien vorgenommen. In gängigen Szenarien aus diesem Sektor, wie etwa der Variante E1 des Leitszenarios 2008 (BMU 2008) wird in der Regel eine Begrenzung der energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen in Deutschland um 40% bis zum Jahr 2020 gegenüber 1990 und um 80% bis zum Jahr 2050 modelliert. Diese Ziele werden in neueren Szenarien oft noch verschärft und liegen z.B. im Innovationsszenario nach Öko-Institut und Prognos (2009) bei -91% bis 2050. Auch ohne Einbezug konkreter Ressourcenziele sind diese Szenarien dennoch von hoher Relevanz für die in MaRess verfolgten Ziele:

- Durch den Energiebedarf in den Sektoren Strom, Wärme und Verkehr wird eine große Menge endlicher energetischer Ressourcen (Primärenergie) verbraucht, so dass eine Betrachtung dieser Sektoren nicht nur aus klimapolitischen, sondern ebenso aus ressourcenpolitischen (und sicherheitspolitischen) Gründen äußerst relevant erscheint;
- bisher existieren keine Abschätzungen über mögliche Trade-offs zwischen Energieeinsparung und gesamtem Rohstoffverbrauch, so dass die Kopplung eines Gebäude-Energiemodells mit einem Stoffstrommodell die Möglichkeit gibt, dieses erstmals gezielt zu analysieren.

Vor diesem Hintergrund werden im folgenden Kapitel die MaRess-Szenarien für das Bedarfsfeld „Warmer Wohnraum“ beschrieben, die auf entsprechenden Energieszenarien aufbauen.

## 2.2 Narrative Beschreibung der MaRess-Szenarien

Als Grundlage der Szenarienerstellung wurde die *Leitstudie 2008* des Bundesumweltministeriums ausgewählt. Basis der Leitstudie ist das zielorientierte *Leitszenario 2008*, das darlegt, wie die energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen bis 2050 in Deutschland auf rund 20% des Werts von 1990 gesenkt werden können“ (BMU 2008). Es bildet die Zwischenziele der Bundesregierung für 2020 ab, die in Beschlüssen der Bundesregierung, einschlägigen Gesetzen und den Regelungen der EU-Kommission festgelegt wurden. Dies betrifft Festlegungen für die Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen, der Steigerung der Energieproduktivität und den Beitrag der erneuerbaren Energien, die einen entsprechenden Strukturwandel in der Energieversorgung auslösen. Aus den Energieszenarien wird für Modellierungszwecke in AS6.2 sowohl der jeweilige Wärmemix im Haushaltsbereich als auch der bundesweite, durchschnittliche Strommix verwendet.

Die allen Szenarien der Leitstudie zugrunde liegenden ökonomischen und sonstigen Basisdaten (zum Beispiel Entwicklung der Bevölkerung, der Haushaltsgrößen) wurden leicht angepasst. Insbesondere die ökonomischen Daten wurden aufgrund der Wirtschaftskrise nach unten korrigiert. Sowohl die Modellierung in *HEAT* als auch die Top-down Modellierung in AP5 basieren auf den gleichen angepassten Daten.

### Szenario *MaRess BAU*

Zur Darstellung, welche Beiträge das *Leitszenario 2008* für die Klimaschutz- und Ressourcenziele liefert, ist es sinnvoll, zunächst eine Referenzentwicklung zu modellieren. Da in der *Leitstudie 2008* zielorientierte Szenarien entwickelt wurden, denen keine solche Referenz-Entwicklung gegenübergestellt wurde, musste zunächst ein eigenes Business-As-Usual-Szenario (BAU) entwickelt werden. Hierfür wurde auf die Referenzszenarien der Energieprognose (IER et al. 2009) und der WWF-Studie „Modell Deutschland“ (Öko-Institut und prognos 2009) zurück gegriffen.

### Szenario *MaRess Leit-Minus*

Das Szenario *MaRess Leit-Minus* entspricht dem *Defizitszenario D1* der *Leitstudie 2008*. Dabei wird einerseits angenommen, dass der Ausbau der erneuerbaren Energien wie geplant erfolgt, sich die erzeugte Menge an Strom und Wärme in absoluten Mengen gegenüber dem *Leitszenario 2008* also nicht verändert. Demgegenüber wird jedoch eine geringere Wirkung der Maßnahmenpakete zur Effizienzsteigerung und zum Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung angenommen. Dadurch erhöht sich die Energienachfrage, so dass der Anteil der erneuerbaren Energien relativ gesehen sinkt.



## Szenario MaRes Leit

Das Szenario *MaRes Leit* entspricht dem Leitszenario 2008, das bereits oben beschrieben wurde.

## Szenario MaRes Leit-Plus

*MaRes Leit-Plus* unterscheidet sich von *MaRes Leit* dadurch, dass die Effizienzbestrebungen im Bedarfsfeld „Warmer Wohnraum“ noch weiter *gesteigert* wurden, indem der Heizenergiebedarf weiter abgesenkt wurde. Die Zusammensetzung des Wärmemix wurde vereinfacht konstant gehalten, so dass sowohl fossile als auch erneuerbare Wärmeträger in absoluten Mengen sinken.

## 2.3 Detaillierung der Szenarien-Eingriffe auf der Nachfrageseite und deren Treibergrößen in HEAT

Ergänzend zu den Basisannahmen auf energetischer Seite wurden in den MaRes-Szenarien weitere Einflussparameter bzw. Treibergrößen (siehe Modul 4) zur Umsetzung von Effizienzmaßnahmen im Wohnungsbereich festgelegt, anhand derer mittels *HEAT* die Nachfrageseite modelliert wird. Sie sind in Tab. 1 zusammengefasst.

Tab. 1: Zusammenfassende Darstellung der Einflussgrößen im Gebäudebereich nach Szenarien

Szenarien				
Einflussgröße	<i>MaRes BAU</i>	<i>MaRes Leit-Minus</i>	<i>MaRes Leit</i>	<i>MaRes Leit-Plus</i>
<b>Zielvorgaben</b> • Leitstudie 2008  • Sonstiges	a. Endenergie b. Erneuerbare	a. Endenergie b. Erneuerbare	a. Endenergie b. Erneuerbare	--- --- <u>Ergebnisorientiert</u> Vollsanierung bei Ausschöpfung der Potenziale der erneuerbaren Energien aus dem Leitszenario
Leitindikatoren der Nutzenergieebene (Gebäudeeffizienz)				
<b>Sanierungsrate</b>	Residuum bis < 0,7% p.a. Derzeitiger Sanierungsrate bei der Umsetzung von Wärmetechnischen Maßnahmen an der Gebäudehülle	Residuum bis < 0,7% p.a.	Residuum < 1,5% p.a. Forcierung flankierender Maßnahmen (Energieberatung Energiepass, KfW)	< 2,5% p.a. Maximale Umsetzung (Vollsanierung)

<b>Anlegbarer Preis</b>		Residuum bis < 4,4 ct/kWh	Residuum bis < 6,7 ct/kWh	8,8 ct/kWh Orientierung an zukünftige Preis- entwicklung der Energieträger
<b>Amortisations- Erwartung</b>		< 4 Jahre Gewinnerwartung von Investitionen bei Haushalten	< 10 Jahre Mittlere Gewin- nerwartung (Ban- kenpraxis)	< 15 – 20 Jahre Orientierung an Lebenszyklen von Bauteilerneuerun- gen
<b>Bauteilanforde- rung (Altbau)</b>	EnEV 2009 (Energiespar- verordnung)	EnEV 2009	-15% HT' (Mittlerer Heizwärmebedarf) (zur Basis EnEV 2009)	Schrittweise Ver- schärfung ab 2020 bis 2050 zum Passivhaus
<b>Neubau bis 2020 2020 – 2050</b>		Residuum -15% HT'	Residuum - 80% HT'	- 80% HT' Passivhaus
<b>Leitindikator(en) der Endenergieebene (Heizungsanlagenmix/-effizienz)</b>				
<b>Potenziale erneuerbare Energien</b>	VORGABE der Referenz- Entwicklung	VORGABE aus dem Leitszenario (D1 verminderte Effizienz)	14,8% der Wärmenachfrage 2020 (ohne Wärmestrom)	Absolut-Werte aus Leitszenario
<b>Technischer Fortschritt (spez. Nutzungsgrad)</b>	BAU	BAU	BAU	BAU

Quelle: Eigene Zusammenstellung

### 3 Modellierungsergebnisse und Schlussfolgerungen

Die Modellierung innerhalb des AS6.2 hat eine Vielzahl neuer Erkenntnisse erbracht. Die drei zentralen Ergebnisse auf methodischer Seite sind

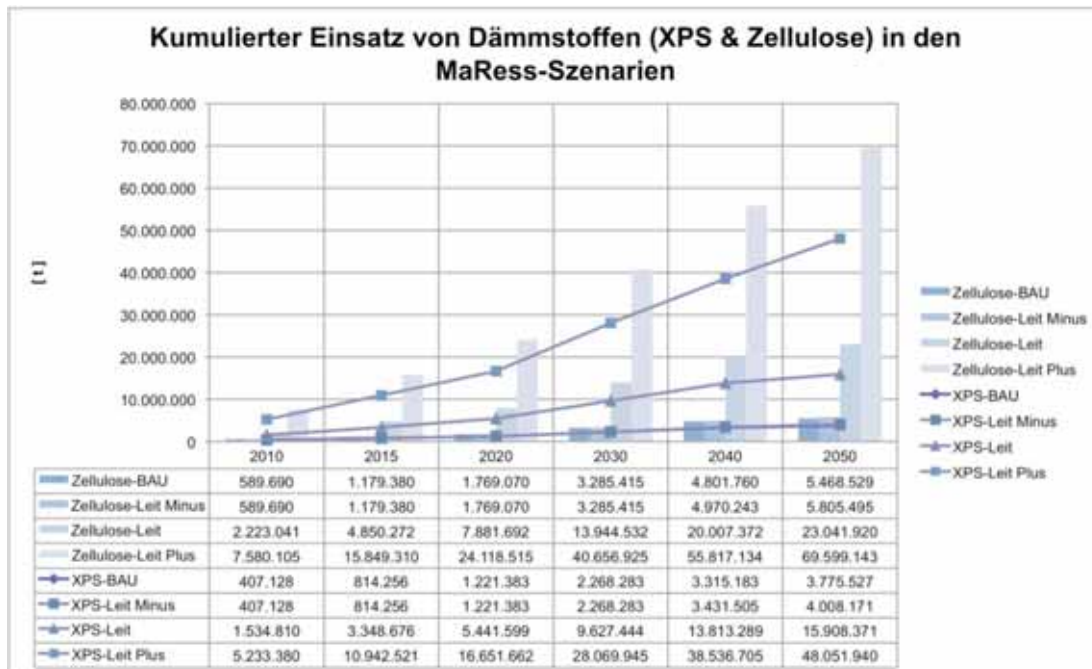
- die Entwicklung des Bottom-up Wirkungsanalyse-Modells und die beispielhafte Anwendung auf das Bedarfsfeld „Warmer Wohnraum“,
- die erstmals durchgeführte Trade-off Analyse zwischen Effizienzsteigerung, Ressourcenverbrauch und Emissionswirkungen und
- die dadurch möglich gewordene Erweiterung „reiner“ Energieszenarien um ressourcenpolitische Analysen.

Das zentrale Ergebnis der Modellanalyse ist, dass zusätzliche Aufwendungen für Dämmstoffe sowohl ressourcen- als auch emissionsseitig in fast allen Umweltwirkungskategorien durch erhebliche Einsparungen bei der Gebäudebeheizung überkompensiert werden. Im Wesentlichen sind keine Trade-offs erkennbar, und der prozentuale Beitrag der Dämmstoffe an den Umweltwirkungsindikatoren ist gering.

Abb. 2 zeigt hierzu zunächst die Entwicklung des kumulierten Dämmstoffeinsatzes in den vier MaRes-Szenarien (im Basisfall wurde der als Linie dargestellte Dämmstoff XPS verwendet).

Der mit zunehmender Eingriffstiefe aufgrund von politischen Vorgaben ansteigende Bedarf an Dämmstoffen ist, insbesondere im Szenario *MaRes Plus*, deutlich zu erkennen.

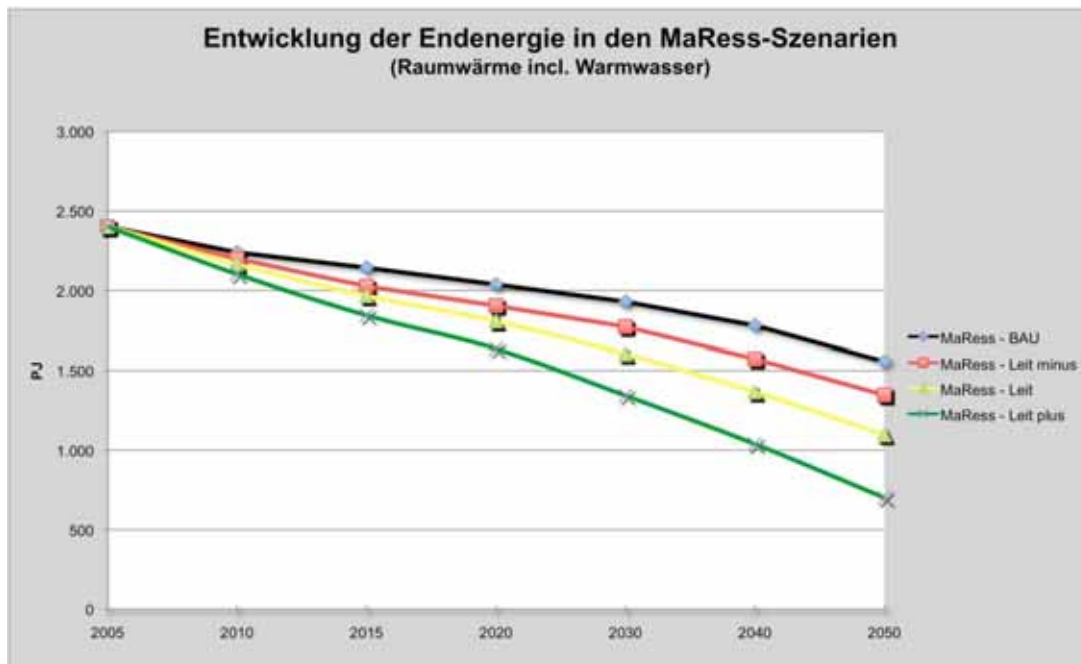
Abb. 2: Kumulierter Einsatz von Dämmstoffen (XPS und Zellulose) in den MaRes- Szenarien *MaRes BAU*, *MaRes Leit-Minus*, *MaRes Leit* und *MaRes Leit-Plus*



Quelle: Eigene Modellrechnungen

In Abb. 3 folgt die Darstellung der aufgrund des Dämmstoffeinsatzes erfolgten Reduktion der Endenergie (Raumwärme inklusive Warmwasser). Im Business-as-usual Pfad (*MaRes BAU*) ist eine Reduktion um 35% bis 2050 möglich. Im Szenario *MaRes Leit-Plus* wirkt sich die Sanierungsqualität (stufenweise Verschärfung der Altbausanierung auf Passivhausstandard) besonders auf den Nutzenergiebedarf aus, so dass ein gleichmäßiger Verlauf von Nutzenergie-, Endenergie und Emissionsreduktion in Verbindung mit dem Einsatz erneuerbarer Energien entsteht. Die forcierte Einsparstrategie führt nutzerenergetisch zu einer Einsparung von 1.250 PJ und einer endenergetischen Einsparung von ca. 1.700 PJ oder 70%.

Abb. 3: Vergleich der Endenergienachfrage in den MaRes-Szenarien *BAU*, *Leit-Minus*, *Leit* und *Leit-Plus* für Raumwärme und Warmwasser bis zum Jahr 2050

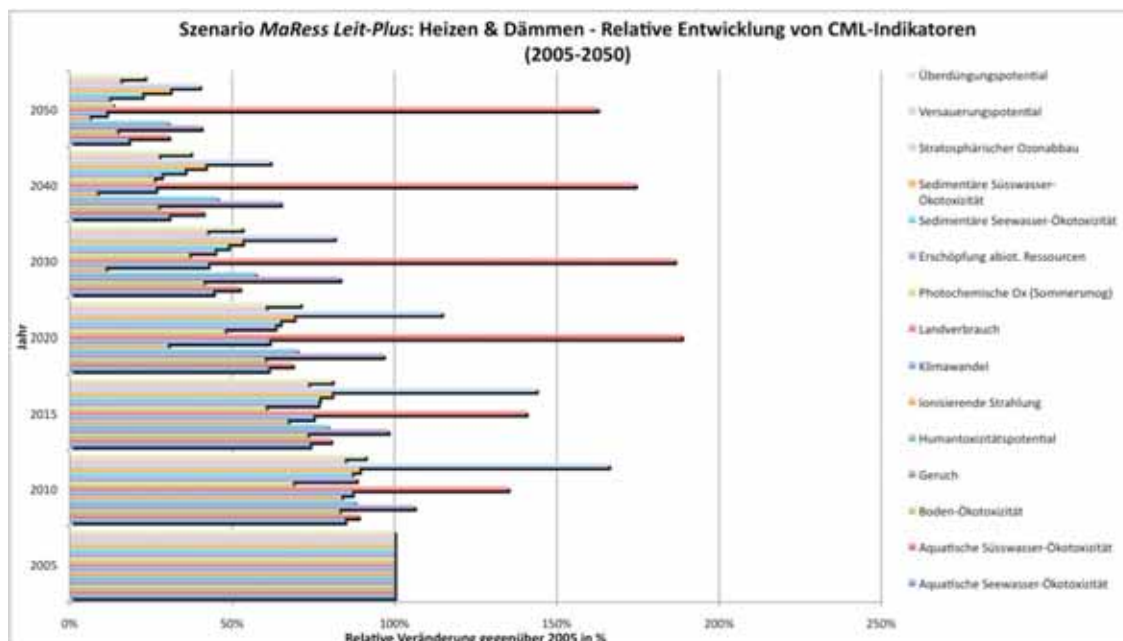


Quelle: Eigene Modellrechnungen

Vergleicht man die Entwicklung der Umweltwirkungen entlang der vier Szenarien, so wird deutlich, dass schon im Referenzfall, dem Szenario *MaRes BAU*, ein kontinuierlicher, aber moderater Netto-Rückgang aller betrachteten Wirkungskategorie-Indikatoren in Höhe von jeweils 30-50% bis 2050 im Vergleich zu 2005 zu beobachten ist. Dieser Rückgang steigt erwartungsgemäß bei forcierter Ressourcen- und Klimapolitik mehr und mehr an und erreicht im Szenario *MaRes Leit-Plus* im gleichen Zeitraum 70-90% Netto-Entlastung (siehe Abb. 4).

Hier (und auch im hier nicht dargestellten Szenario *Maress Leit*) sind bei drei Umweltwirkungskategorien jedoch zunächst gegenläufige Entwicklungen zu beobachten: Die beiden Wirkungskategorien „Geruch“ und „Stratosphärischer Ozonabbau“ steigen bis zum Jahr 2010 zunächst an und gehen erst dann analog zu den anderen Kategorien zurück. Die Wirkungskategorie „Landverbrauch“ steigt bis zum Jahr 2020 an und wird erst danach (leicht) reduziert.

Abb. 4: Relative Entwicklung von Umweltwirkungs-Indikatoren im Szenario *MaRes Leit-Plus*



Quelle: Eigene Modellrechnungen

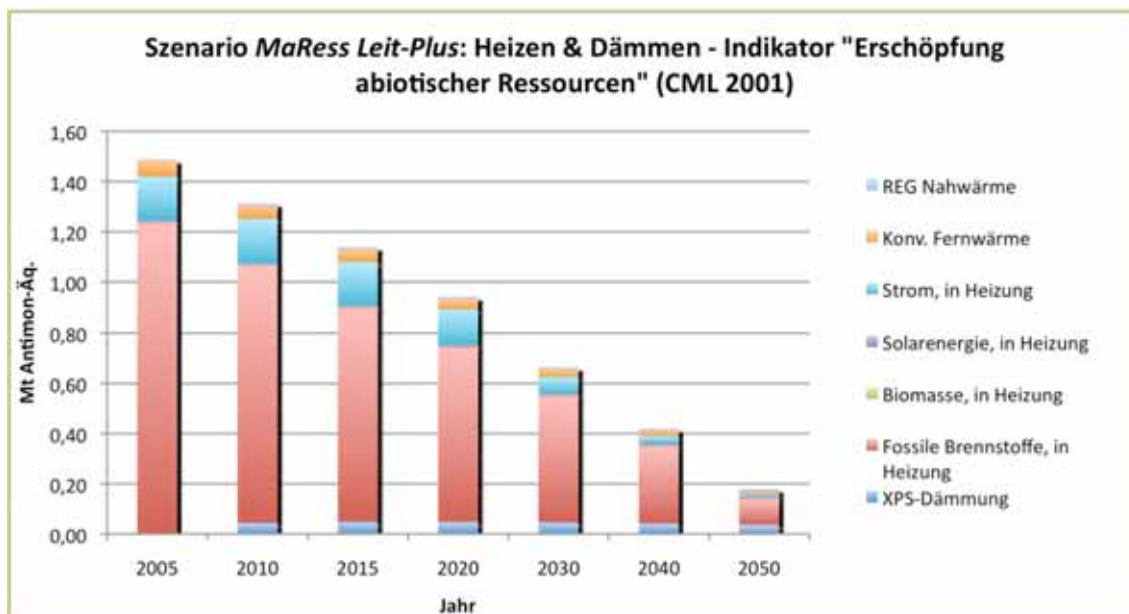
Dies liegt in folgenden Entwicklungen begründet:

- Der von fossilen Brennstoffen dominierte Indikator „Geruch“ steigt durch zunehmende Biomasse-Anteile im Strommix und regenerative Nahwärme zunächst über den Wert des Basisjahres an, sinkt bis 2050 aber durch die Einsparung fossiler Heizenergie darunter ab. Die verstärkte Biomassenutzung kann sich auch auf die Feinstaub-Belastung auswirken, die hier aber nicht separat erfasst wird, sondern ein Bestandteil des Indikators „Humantoxizitätspotenzial“ ist.
- Auch der grundsätzlich durch die Nutzung fossil befeuerter Heizungen dominierte Indikator „Stratosphärischer Ozonabbau“ steigt auf Grund zusätzlicher prozessbedingter Emissionen der Herstellung von XPS-Dämmstoffen zunächst um über 50% des Werts des Basisjahres 2005 an. Durch die Einsparung von fossiler Heizenergie auf Grund der Dämmung wird dieser Effekt bereits ab 2030 kompensiert, und im weiteren Verlauf sinkt die Belastung bis 2050 deutlich um etwa 60% des Bezugswertes.
- Der Anstieg des Indikators „Landverbrauch“ liegt ebenfalls im zunehmenden Einsatz von Biomasse-Heizungen im Wärmemix begründet. Durch die steigende Nutzung von Biomasse in Pellet- und Stückholz-Heizungen liegt dieser Indikator in 2050 als einziger über dem Basiswert von 2005. Diese Entwicklung ist jedoch unabhängig von Effizienzmaßnahmen zu sehen, da sie auf Szenario-Annahmen zur Deckung des restlichen Wärmebedarfs durch erneuerbare Energien zurück geht. Da bei steigendem Bedarf nach forstlicher Biomasse und begrenztem inländischen Potenzial vermehrt Nutzungskonkurrenzen mit stofflichen Verwendungen und stei-

gende Importabhängigkeiten zu erwarten sind, sollte das Leitszenario des BMU auf der Basis eines umfassenden Biomassekonzepts und unter Würdigung der in- und ausländischen Flächennutzungen überprüft werden.

Aus Abb. 4 ist ebenfalls ersichtlich, dass auch der Wirkungsindikator „Erschöpfung abiotischer Ressourcen“ trotz massiven Einsatzes von Dämmstoffen kontinuierlich reduziert wird. Abb. 5 zeigt in einer Detailanalyse, welche Prozesse zur Ressourcenerschöpfung beitragen, wiederum am Beispiel des Szenarios *MaRes Leit-Plus*. Danach ist der Anteil des Dämmstoffes XPS mit 3% in 2010 und 10% in 2050 sehr gering – der weit überwiegende Teil der Belastungen resultiert aus der Nutzung fossiler Energiequellen zu Heizzwecken.

Abb. 5: Absolute Entwicklung des Umweltwirkungs-Indikators „Erschöpfung abiotischer Ressourcen“ im Szenario *MaRes Leit-Plus*

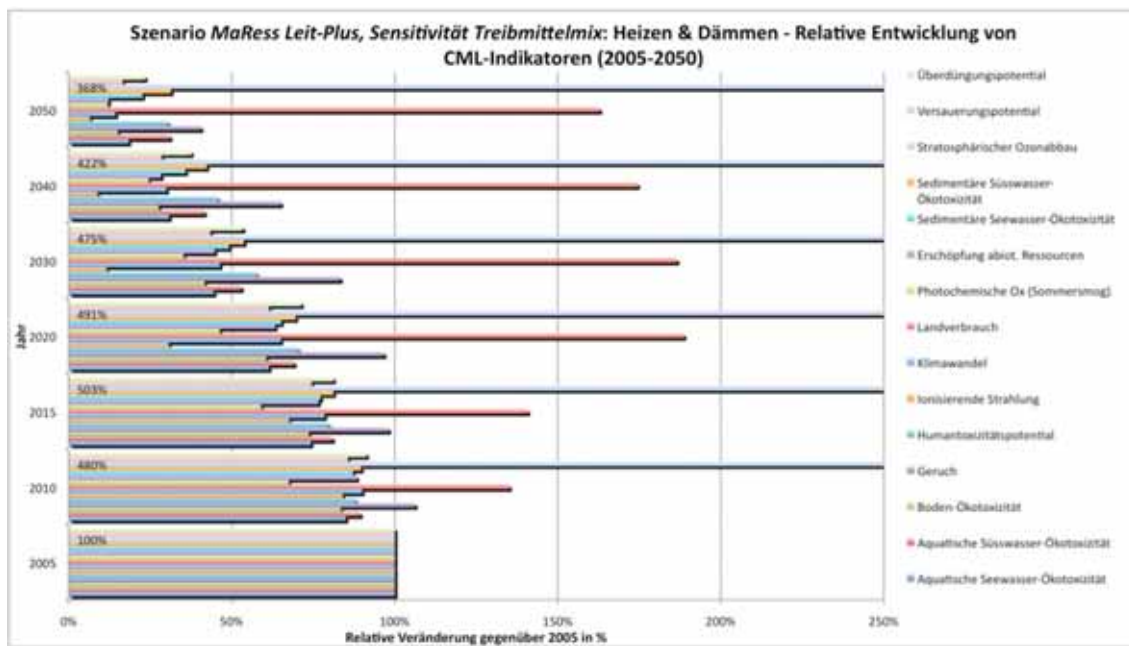


Quelle: Eigene Modellberechnungen

Relevant ist die Wahl des Treibmittels bei den aufgeschäumten XPS-Dämmstoffen (siehe Abb. 6): Für die Basisanalyse wurde angenommen, dass 90-96% des in Deutschland verwendeten XPS mittels CO<sub>2</sub> aufgeschäumt wird und der Rest jeweils zur Hälfte durch die Fluorkohlenwasserstoffe FKW 134a und FKW 152a abgedeckt wird. Da dies in anderen Ländern erheblich abweichen kann, wurde in einer Sensitivitätsanalyse eine Treibmittel-Zusammensetzung von 50% CO<sub>2</sub> und jeweils 25% FKW 134a und FKW 152a angenommen. Im Endergebnis führt dies zu einem erheblichen Trade-off bezüglich der Wirkungskategorie „Stratosphärischer Ozonabbau“ (die Belastung durch die Dämmung übersteigt die Entlastung durch die entsprechende Energieeinsparung um 500% in 2015 und geht auf 368% in 2050 zurück) und zu einer erkennbaren, jedoch nicht so deutlichen Wirkung auf das Treibhaus-Potenzial.

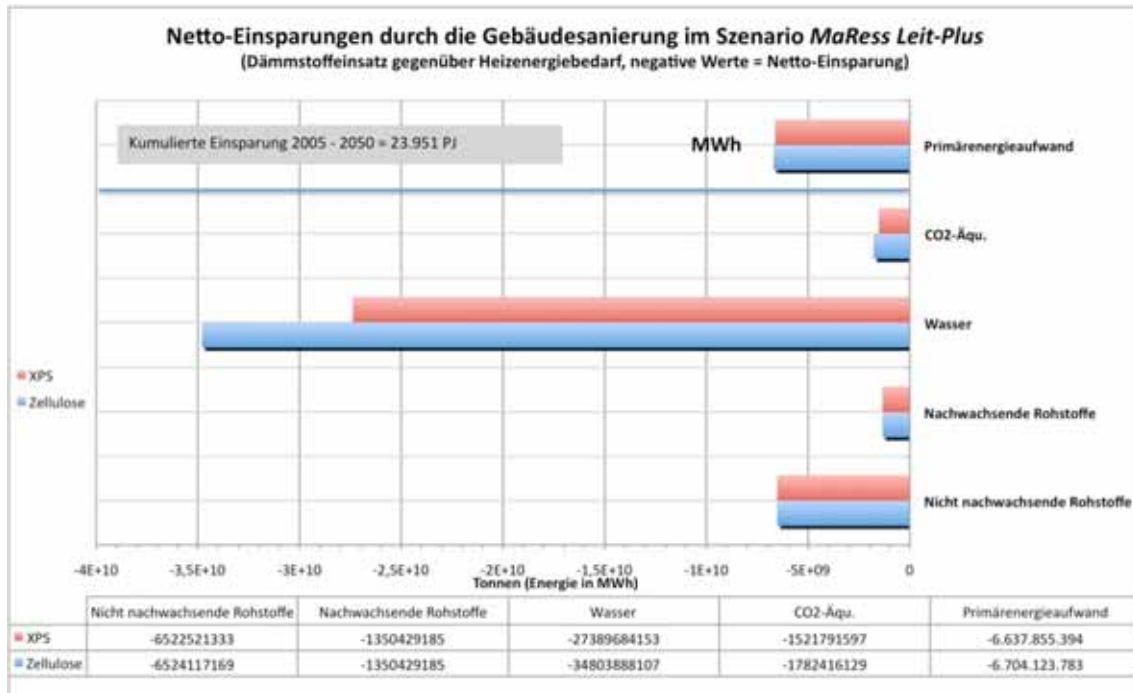
In einer zweiten Sensitivitätsanalyse wurde das alternative Dämmmaterial Zellulose (aus Altpapier) verwendet. Wie in Abb. 2 bereits zu sehen war, ist einerseits – bei gleichem Wärmedämmstandard – ein erheblicher Mehrverbrauch von Zellulose im Vergleich zu XPS zu verzeichnen, da XPS eine wesentlich geringere Dichte als Zellulose aufweist. Die Ökobilanzergebnisse zeigen jedoch, dass sich die an sich schon geringen Anteile der Dämmstoffe an den Wirkungsindikatoren weiter verringern.

Abb. 6: Relative Entwicklung von CML-Indikatoren im Szenario *MaRes Leit-Plus (Sensitivität Treibmittel)* – Werte zwischen 250 und 500% abgeschnitten



Quelle: Eigene Modellrechnungen

Abb. 7: Ergebnisse der Trade-off Analyse (Ressourceneinsatz versus Einsparungen) der Dämmstoffvarianten XPS und Zellulose



Quelle: Eigene Modellrechnungen

Betrachtet man neben den Wirkungsindikatoren aus der Ökobilanzierung auch das Ressourcenindikatoren-Set MIPS, so wird deutlich, dass XPS- und Zellulose-Dämmung mit vergleichbaren Auswirkungen auf die Materialintensität verbunden sind. Die kumulierten Nettoeffekte, die sich hier aus dem Dämmstoffeinsatz in Gegenüberstellung mit der Einsparung von Heizenergie ergeben, werden in Abb. 7 dargestellt. Sie umfassen eine Abschätzung der Salden des Primärenergieaufwandes, der Treibhausgasemissionen sowie des Bedarfs an Wasser, biotischen und abiotischen Rohstoffen. Die negativen Indikatorwerte zeigen dabei an, dass durch die Dämmwirkung und den damit verbundenen starken Heizenergieerückgang in beiden Fällen die Material-Mehrverbräuche durch die Einsparungen überkompensiert werden. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass ambitionierte Dämmstoffstrategien sowohl mittels XPS als auch Zellulose im Hinblick auf alle in diesem Arbeitsschritt analysierten Faktoren einen wesentlichen Beitrag sowohl zu Materialeffizienz- als auch zu Emissionsminderungszielen leisten.

Grundsätzlich können sich bei der Verwendung holzbasierter Dämmstoffe Konkurrenzsituationen ergeben. Im Fall der Zellulose wäre aber selbst bei einer Vollsanierung bis 2050 ausschließlich auf Basis dieses Dämmstoffes gemäß Abb. 2 mit einem Aufwand von durchschnittlich etwa 1,2 Millionen Tonnen Altpapier pro Jahr zu rechnen. Dies entspricht ca. 8% des inländischen Altpapieraufkommens in 2007 von 15,4 Millionen Tonnen (VDP 2010). In einem realitätsnahen Dämmstoffmix sind Nutzungskonkurrenzen mit der Recyclingpapier-Herstellung und indirekte Flächenkonkurrenzen um forstli-



che Ressourcen daher eher als gering einzuschätzen, aber dennoch im Rahmen der Festlegung einer Dämmstoffstrategie zu prüfen.

Da die energetischen Ressourcen einen wesentlichen Anteil an den Umweltauswirkungen des Bedarfsfeldes „Warmer Wohnraum“ haben, konnte in einem ersten Schritt dennoch die detaillierte Modellierung energie- und klimapolitischer Ansätze in Verbindung mit einer Ressourcenpolitik (insbesondere im Hinblick auf die Gebäudedämmung) durchgeführt werden. Dies stellt eine erhebliche Erweiterung bisheriger „reiner“ Energieszenarien dar, die nicht auf die Ressourcenseite fokussiert sind und in der Regel emissionsseitig nur Treibhausgasemissionen betrachten.

## 4 Politikempfehlungen und Forschungsbedarf

Die dargestellten Ergebnissen führen zu folgenden Politikempfehlungen:

- Energieeinspar- und Effizienzstrategien, wie sie in den verwendeten MaRess-Szenarien, die auf dem BMU-Leitszenario 2008 aufbauen, modelliert wurden, sollten zügig umgesetzt werden. Entsprechende politische Vorgaben hätten eine positive Wirkung auf fast alle Umweltwirkungskategorien, insbesondere den stofflichen Ressourcenverbrauch und fast alle Emissionsindikatoren.
- Der erhöhte Flächenverbrauch, der sich (indirekt) aus der Zunahme von Biomasse-Heizanlagen ergibt, sollte bei der Umsetzung einer Erneuerbare-Energien-Strategie bedacht werden. Hierzu bedarf es einer umfassenden Biomassestrategie, die den Einsatz für Ernährung, Materialien und Energie gemeinsam betrachtet und die inländische und ausländische Flächennutzung berücksichtigt.
- Aufgrund des erheblichen Trade-offs, der sich ergibt, wenn der Dämmstoff XPS nicht mit CO<sub>2</sub>, sondern mit Fluorkohlenwasserstoffen (FKW) aufgeschäumt wird, sollte industriepolitisch auf eine weitere Reduktion der FKW in Dämmstoffen hingewirkt werden. Während in Deutschland bereits weitgehend CO<sub>2</sub> verwendet wird (angenommen wurde ein Anteil von 90-96%), betrifft dies insbesondere Dämmstoffe, die in anderen Ländern der EU hergestellt werden.
- Nicht nur bei Dämmstoffen, sondern generell bei Baustoffen sollten vertieft die Ressourcenauswirkungen ihrer Herstellung analysiert werden und in industriepolitische Instrumente einfließen.
- Es sollte darauf hingewirkt werden, dass ein standardisierbarer Bilanzierungsansatz entwickelt wird, der die immer noch in Entwicklung befindliche Ökobilanz-Methodik mit umfassenden stofflichen Ressourcenindikatoren koppelt. Weiterhin sollten aktuelle, harmonisierte, reviewte und fortschreibbare Datensätze bereit gestellt werden.

Aus der Analyse der offenen Fragen, die sich während der Projektbearbeitung ergeben haben, wurde zudem eine Reihe von Forschungsaspekten abgeleitet, die in einem möglichen Nachfolgeprojekt mit ausreichenden Ressourcen bearbeitet werden sollten.

### **Technologiemodell HEAT**

- *Modellierung des Baubestandes:* Neben der hier erfolgten Betrachtung der Dämmmaterialien bei der energetischen Sanierung sollte auch eine Veränderung des eigentlichen Baubestandes modelliert werden. Hierunter fallen die Optionen Abriss, Neubau oder Recycling. Ebenso sollten neben der Dämmung weitere Materialien wie zum Beispiel der Austausch von Fenstern mit berücksichtigt werden. Ein solcher Arbeitsschritt erfordert die Bilanzierung der in den 44 verschiedenen Haustypen verbauten Stoffströmen sowie eine Abschätzung zukünftig erfolgreicher Materialströme durch Neubau oder Abriss. Aufgebaut werden kann in diesem Arbeitsschritt auf den Arbeiten aus MaRes-AS4.4, in der für drei Haustypen exemplarisch entsprechende Überlegungen angestellt wurden.
- *Erweiterung von HEAT:* Erweiterung des MaRes-Gebäudetypenmodells durch Siedlungstypenansatz zur besseren Einbettung von erneuerbaren Energien (Berücksichtigung vieler, dezentraler Anlagen inklusiver lokaler Netze und Speicher).
- *Berücksichtigung des Klimawandels:* Es sollten zukünftig Annahmen getroffen und nach Möglichkeit in die Modellrechnungen einbezogen werden, inwieweit sich der Klimawandel auf den Wärme- und Kältebedarf in Gebäuden auswirkt.

### **Bottom-up Modellierung**

- *Quantifizierung:* Von den Politik-Wissenschaftlern sollte die Quantifizierung von Politik-Ansätzen beziehungsweise bereits weiter entwickelter Instrumente methodisch angegangen werden. Ziel sollte es sein, die kurz-, mittel- und langfristigen Wirkungen identifizierter Politikmaßnahmen auf einer Zeitachse bis 2050 abschätzen zu können. Gleichzeitig sollte ein oder mehrere Zielindikatoren entwickelt werden, die in Langfrist-Szenarien modelliert werden können.
- *Weitere Bedarfsfelder:* Übertragung des entwickelten Ansatzes auf weitere Bedarfsfelder (zum Beispiel Mobilität, Ernährung oder Konsum). Hierzu müssen entsprechende „Technologiemodelle“, wie sie für das Bedarfsfeld „Warmer Wohnraum“ mit dem HEAT-Modell vorlagen, genutzt oder neu entwickelt werden. Für das Bedarfsfeld Mobilität bietet sich beispielsweise die Kopplung mit dem TREMOD-Modell des ifeu Heidelberg an.
- *Erneuerbare und Ressourcenverbrauch:* Innerhalb des AS6.2 wurden Trade-offs zwischen Effizienzsteigerung, Ressourcenverbrauch und Emissionswirkungen gerechnet. Aufbauend auf dem entwickelten Modellansatz sollten ebenso der Ausbau der erneuerbaren Energien gemäß der Leitstudie und dessen Auswirkungen auf den Ressourcenverbrauch gerechnet werden. Insbesondere sollten die Szenarien der Leitstudie im Hinblick auf den globalen Flächenbedarf für alle Biomasseverbräuche in Deutschland überprüft werden.
- *Aktualisierung der Szenarien:* Die MaRes-Szenarien basieren auf den Szenarien der Leitstudie 2008. Nach Veröffentlichung der neuen Leitstudie 2010 sollten die MaRes-Szenarien entsprechend angepasst werden.

### Bottom-up versus Top-down Modellierung

- Die Modellergebnisse der Bottom-up Modellierung sollten mit den Ergebnissen der von den Modellierern in AP5 parallel durchgeführten Top-down Rechnung abgeglichen werden. Dieser Schritt konnte in AS6.2 aus zeitlichen Gründen nicht mehr durchgeführt werden. Es sollte anhand eines Beispiels (etwa des Szenarios *MaRes Leit*) verglichen werden, ob nennenswerte Abweichungen zwischen den beiden Modellansätzen entstehen und wenn ja, worauf sie beruhen. Geprüft werden sollte, ob die Ergebnisse mittels eines Hybrid-Modells optimiert werden könnten. So könnten Daten des Top-down Modells im Bottom-up Modell eingesetzt werden, wenn dort keine eigenen Ökobilanzdaten oder Daten mit nicht ausreichender Qualität zur Verfügung stehen.

### Ökobilanzen und Ressourcenindikatoren

- *Kopplung von Ökobilanzen und MIPS*: Die Entwicklung der Ökobilanzmethodik (LCA) ist nicht abgeschlossen. So fehlt eine umfassende Erfassung und Bewertung abiotischer und biotischer Ressourcenentnahmen. Zu diesem Zwecke wurde zum Beispiel die MIPS-Methode entwickelt, die grundsätzlich eine Variante der LCA darstellt, mit einem Fokus auf die Input-Seite und umfassender Erhebung der Entnahmen von Primärmaterial. Einer der Hauptindikatoren des MIPS-Konzepts, der TMR, wird auch auf gesamtwirtschaftlicher Ebene eingesetzt und soll nach Verbesserung der Datenverfügbarkeit langfristig als „Headline“-Indikator eingesetzt werden (ESTAT, OECD).

Die Systemgrenzen und Allokationsregeln von LCA und MIPS entsprechen sich sehr weitgehend. Dennoch gibt es verschiedene Abweichungen, die künftig harmonisiert werden sollten. Auf der einen Seite existieren verschiedene international, langjährig weiter entwickelte Datenbanken mit Ökobilanz-Modulen (wie die hier verwendete ecoinvent-Datenbank). Diese sind gemäß Ökobilanz-Methodik auf die Emissionen von Produkten oder Dienstleistungen ausgerichtet, erfassen teilweise ausgewählte Substanzflüsse auf der Inputseite bis zur Förderung der Rohstoffe (mit dem Indikator „Erschöpfung abiotischer Ressourcen“). Auf der anderen Seite existiert die von MIPS bekannte Methodik, deren Schwerpunkt die Betrachtung der gesamten Ressourcenflüsse eines Produktes ist. Beide Ansätze werden bereits in einer Vielzahl von Einzelstudien kombiniert (u.a. in MaRes 1), wobei Schlüsselindikatoren wie THG-Emissionen mit MI-Kategorien sowie Flächenaufwand verbunden werden. Allerdings fehlt noch eine Harmonisierung im Bereich der bislang standardmäßig vertriebenen Ökobilanz-Software-Pakete.

Daher ist es nötig, beide Ansätze zu koppeln und idealerweise das Instrument der Ökobilanzierung um die beim MIPS-Konzept betrachteten Ressourcenkategorien zu erweitern. Dies erfordert einen Input in die LCA-Diskussion auf internationaler und nationaler Ebene, zum Beispiel über die UNEP/SETAC International Life Cycle Initiative oder das deutsche Netzwerk Lebenszyklusdaten.

- *Erweiterung bestehender Ökobilanz-Software:* Parallel zum ersten Punkt ist es notwendig, die MIPS-Methodik auch softwaretechnisch in Einklang mit Ökobilanzen zu bringen. Hier bietet es sich an, mit Software-Entwicklern (zum Beispiel ifu Hamburg für die Software Umberto) bestehende Software-Produkte und Datenbanken um den MIPS-Ansatz zu erweitern. Hierzu hatte es bereits Gespräche mit den Anbietern gegeben.
- *Weiterentwicklung von Ressourcenindikatoren:* Für viele der gängigen Umweltwirkungskategorien besteht weiterhin methodischer Forschungsbedarf. So ist auch hinsichtlich der Wirkungskategorie „Rohstoffbeanspruchung“ die Diskussion um einen geeigneten Rohstoffindikator noch nicht beendet. Indikatorensets wie MIPS zur Erfassung der lebenszyklusweiten Entnahme von Primärmaterial aus der natürlichen Umwelt stellen hier mögliche Lösungsansätze dar, deren Eignung und Richtungssicherheit im Rahmen eines Differenzierungsprozesses zu diskutieren und zu verbessern sind. Zu diesem Zweck wurde bereits ein internationaler Workshop unter Federführung des Wuppertal Instituts im Rahmen des MaRes-Projekts durchgeführt.
- *Erweiterung von Datenbeständen:*
  - Datenbestände zur Rohstoffbeanspruchung sollten aktualisiert und harmonisiert (Abgleich von Annahmen, Daten und Systemgrenzen) sowie dynamisiert (Fortschreibung auf 2025 und 2050) werden.
  - Ebenso sollte eine Reihe von Ökobilanz-Datenbeständen (zum Beispiel Geothermiekraftwerke, fossile Heizkraftwerke) aktualisiert und harmonisiert werden; Ressourcenindikatoren sollten in neue und in aktualisierte Datensätze integriert werden; hier bietet sich ebenso eine Zusammenarbeit mit dem deutschen Netzwerk Lebenszyklusdaten an.
  - Die Bestandsaufnahme ressourcenintensiver Infrastrukturen sollte weiter voran getrieben werden; Bestandserweiterung und Recyclingoptionen („urban mining“) sollten unter Anwendung verschiedener Langfristszenarien geprüft werden.
  - Die Prozesskettenmodellierung innerhalb von Ökobilanzen sollte mit dem Ziel weiter entwickelt werden, dynamische Veränderungen in der Prozesskette einfacher und umfassender berücksichtigen zu können (zum Beispiel veränderte Materialzusammensetzungen beziehungsweise Energiebedarfe in allen Produktionsstufen).

## 5 Literatur

- Acosta-Fernandez, José / Bleischwitz, Raimund / Krause, M. / Ritthoff, Michael / Scharp, M. / Stürmer, M. / Wilts, Henning et al. (2009): Verbesserung von Rohstoffproduktivität und Ressourcenschonung; Teilvorhaben 1: Potenzialermittlung, Maßnahmenvorschläge und Dialog zur Ressourcenschonung, Forschungsprojekt von Wuppertal Institut und Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung im Auftrag des Umweltbundesamtes; Berlin
- BMU (2008): Weiterentwicklung der „Ausbaustrategie Erneuerbare Energien“ vor dem Hintergrund der aktuellen Klimaschutzziele Deutschlands und Europas; Leitstudie 2008; Berlin
- DIN (2006a): Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006)
- DIN (2006b): Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitung (ISO 14044:2006)
- Guinée, Jeroen B. (Hrsg.) (2002): Handbook on Life Cycle Assessment: Operational Guide to the ISO Standards; Band 7; Eco-efficiency in industry and science; Dordrecht u.a.: Kluwer Academic Publishers
- IER / RWI / ZEW (2009): Die Entwicklung der Energiemärkte bis 2030 (Energieprognose 2009); unveröffentlicht
- ifeu (2010): Fortschreibung und Erweiterung: Daten- und Rechenmodell: Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland 1960-2030 (TREMODO, Version 5); Endbericht im Auftrag des Umweltbundesamtes; Heidelberg.
- Öko-Institut / prognos (2009): Modell Deutschland. Klimaschutz bis 2050: Vom Ziel her denken.
- VDP [Verband Deutscher Papierfabriken] (2010): Papier Recyceln. <http://www.vdp-online.de/pdf/Papierrecyceln.pdf> (24.09.2010)