

Methodenentwicklung für nachhaltige Energie- und Emissionsminderungsstrategien auf der Grundlage von Lebenszyklusanalysen

Markus Hardi

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Dr.-Ing. Hans-Georg Herzog

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ulrich Wagner
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Hermann-Josef Wagner (Ruhr-Universität Bochum)

Die Dissertation wurde am 07.07.2003 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Elektro- und Informationstechnik am 07.10.2003 angenommen.

Abstract

Die Arbeit beschreibt Maßnahmen im Haushaltsbereich und in der Land- und Forstwirtschaft zur Minderung von Primärenergieverbrauch und treibhausgaswirksamen Emissionen unter dem Aspekt der Vermeidungskosten. Eine Vielzahl von Maßnahmen und Produkten wird unter ganzheitlicher Sicht lebenszyklisch von der Herstellung über die Nutzung bis zur Entsorgungsphase untersucht und ausgewiesen. Ein Strukturmodell der bayerischen Haushalte, das auf der Basis von Typgebäuden und der aus einem Feldversuch stammenden Altersstruktur der Heizungskessel erstellt wird, bildet die Ausgangsbasis für Einsparpotentiale.

In der Strukturanalyse der Land- und Forstwirtschaft werden erstmalig nicht nur der Energiebedarf und die Emissionen, sondern auch das durch die Photosynthese in den pflanzlichen und später in tierischen Produkten gebundene CO₂ in Form einer Input-Output-Analyse berücksichtigt.

This thesis describes measures in the household range and in agriculture and forestry to reduce primary energy consumption and greenhouse-gas-effective emissions under the aspect of avoidance costs. A multitude of measures and products is examined and disclosed under an integrated life-cycle view from fabrication, over utilization up to disposal. A structure model of the Bavarian households is generated on basis of type buildings and the age structure of heating boilers out of a field trial. Afterwards this structure is used to develop energy and emission reduction strategies and to calculate saving potentials.

The structure analysis of agriculture and forestry is carried out as an input-output-analysis including not only energy demand and emissions, but also the CO₂, bound by photosynthesis in plants and later in animal products.

Inhaltsverzeichnis

Bildverzeichnis.....	4
Tabellenverzeichnis.....	5
Formelverzeichnis	7
1 Einführung und Zielsetzung.....	8
2 Definitionen und Methodik.....	10
2.1 Vorgehensweise.....	10
2.2 Untersuchungsrahmen	11
2.3 Kumulierter Energieaufwand	13
2.4 Kumulierte Emissionen.....	14
2.5 Bindungsmechanismen von Kohlendioxid durch Photosynthese.....	17
2.6 Kumulierte Kosten	20
2.7 Relative Einspareffekte und Vermeidungskosten	21
2.8 Verfahren zur Auswahl von Maßnahmen.....	26
3 Ausgangsbedingungen im Jahr 2000	28
3.1 Energiebilanz Bayern.....	28
3.2 CO ₂ -Emissionsbilanz Bayern	30
4 Maßnahmen im Haushaltsbereich und Berechnungsalgorithmen.....	31
4.1 Wärmedämmung von Gebäuden	31
4.1.1 Dämmung von Dach und Decke.....	33
4.1.2 Dämmung von Wänden	34
4.1.3 Dämmung im Kellerbereich	34
4.1.4 Einbau von neuen Fenstern.....	35
4.2 Wärmeversorgung von Gebäuden	35
4.2.1 Modernisierung von Heizungsanlagen	35
4.2.2 Wärmepumpenheizungen.....	36
4.2.3 Warmwasserbereitung durch Kollektoranlagen	37
4.2.4 Biogen befeuerte Heizungsanlagen	38
4.2.5 Biomasse-Heizwerk.....	40
4.2.6 Blockheizkraftwerk.....	40
4.2.7 Biogas-BHKW	41
4.3 Minderung von Stromverbrauch und –bezug.....	42
4.3.1 Blockheizkraftwerk.....	42
4.3.2 Photovoltaikanlagen.....	43
4.3.3 Kompakt-Leuchtstofflampen (KLL).....	43
4.4 Aufbau und Struktur der Maßnahmenberechnung	44

5	Strukturanalyse der Haushalte als Grundlage für Potentialabschätzungen.....	50
5.1	Wohngebäudestruktur in Bayern	50
5.2	Personenbelegung pro Quadratmeter Wohnfläche	54
5.3	Ermittlung des Jahresstrombedarfs	55
5.4	Ermittlung des Kesselbaujahres	55
5.5	Bildung von Typgebäuden.....	59
5.6	Struktur des Energieeinsatzes bei den bayerischen Haushalten 2000	60
6	Vermeidungskosten der Einzelmaßnahmen im Haushaltsbereich	64
6.1	Primärenergie-Vermeidungskosten.....	64
6.2	CO ₂ -Vermeidungskosten.....	65
7	Potentialabschätzung für den Haushaltsbereich.....	67
7.1	Randbedingungen	67
7.2	Potentialabschätzung für die einzelnen Maßnahmengruppen	69
7.2.1	Wärmedämmung	70
7.2.2	Austausch der Heizkessel	71
7.2.3	Kollektoranlagen	72
7.2.4	Photovoltaikanlagen.....	73
7.2.5	Kompaktleuchtstofflampen	73
7.3	Potentialabschätzungen für verschiedene Zielgrößen.....	73
7.3.1	Primärenergie.....	73
7.3.2	Kohlendioxid.....	74
7.3.3	Primärenergie-Vermeidungskosten	75
7.3.4	Kohlendioxid-Vermeidungskosten	75
7.4	Vergleich der Potentialabschätzungen.....	76
7.5	Sensitivitätsanalysen und Variationsrechnungen	79
8	Maßnahmen in der Land- und Forstwirtschaft	82
8.1	Winterweizenanbau	82
8.2	Wirtschaftswald.....	83
8.3	Biodieselerzeugung	83
8.4	Schweinezucht.....	85
9	Strukturanalyse der Land- und Forstwirtschaft als Grundlage für Potentialabschätzungen	88
9.1	Strukturanalyse für die Bewirtschaftung von Feld, Acker und Wald.....	88
9.1.1	Energieeinsatz	90
9.1.2	Maschinen und Geräte.....	91
9.1.3	Düngemittel	92
9.1.4	Pflanzenschutzmittel.....	93
9.1.5	Saatgut.....	94

9.1.6	Bindung in Holz durch Forstwirtschaft.....	95
9.1.7	Bindung in pflanzlichen Produkten	96
9.1.8	Ergebnis der Strukturanalyse für Feld, Acker und Wald	98
9.2	Struktur der Veredelungswirtschaft.....	99
9.2.1	Energieeinsatz für die Veredelungswirtschaft.....	99
9.2.2	Maschinen und Geräte.....	101
9.2.3	Futtermittel	101
9.2.4	Abatmung von CO ₂ in der Tierhaltung.....	103
9.2.5	CO ₂ _{phr} in Exkrementen der Tierhaltung	104
9.2.6	Methanfreisetzung in der Tierhaltung	105
9.2.7	Bindung in tierischen Produkten	106
9.2.8	Ergebnis der Strukturanalyse der Veredelungswirtschaft.....	106
9.3	Gesamtstruktur der Land- und Forstwirtschaft.....	107
10	Potentialabschätzung für die Land- und Forstwirtschaft.....	111
10.1	Randbedingungen	111
10.2	Potentialsabschätzung	111
10.3	Variationsrechnungen und Sensitivitätsanalysen	112
11	Zusammenfassung und Ausblick.....	114
12	Literatur.....	117
13	Anhang	121
13.1	Abkürzungen	121
13.2	Definitionen	122
13.3	Vereinfachtes Verfahren zur Ermittlung des Jahres-Heizwärmebedarfs [13]	123
13.4	Personenbelegung pro Quadratmeter Wohnfläche für Bayern im Jahr 2000	124
13.5	Nutzungsgrade der installierten Wärmeerzeuger und Wärmeverteilungen	124
13.6	Spezifische Emissionsfaktoren der Energieträger	125
13.7	Aufwandszahlen der Energieträger	126
13.8	Rahmendaten der Wirtschaftlichkeitsrechnung	126
13.9	Typgebäude.....	127

Bildverzeichnis

Bild 2-1:	Struktur und den Aufbau der vorliegenden Arbeit.....	10
Bild 2-2:	Differenzbetrachtung	22
Bild 2-3:	Vorzeitiger Austausch eines Systems.....	24
Bild 2-4:	Amortisationszeit für Systemvergleich – mögliche Fälle	26
Bild 3-1:	Energieflussbild Bayern 2000.....	28
Bild 3-2:	Entwicklung des Endenergieverbrauchs in Bayern von 1970 bis 2000	29
Bild 3-3:	Aufteilung der direkten Emissionen auf die Sektoren	30
Bild 4-1:	Schema bei der Maßnahmenberechnung.....	45
Bild 5-1:	Energieträgermix der Bayerischen Haushalte im Jahr 2000	61
Bild 5-2:	Aufteilung der CO ₂ -Emissionen der Bayerischen Haushalte im Jahr 2000 auf die Energieträger	62
Bild 6-1:	Spezifische PE-Vermeidungskosten über die gesamte Kette für die Potentialabschät- zung mit der Zielgröße CO ₂ -k _v	65
Bild 6-2:	Spezifische CO ₂ -Vermeidungskosten über die gesamte Kette für die Potentialabschät- zung mit der Zielgröße CO ₂ -k _v	66
Bild 7-1:	Kosten-Vermeidungskurve für PE	78
Bild 7-2:	Kosten-Vermeidungskurve für CO ₂	79
Bild 8-1:	Stammbaum einer Muttersau mit CO ₂ -Bilanz	86
Bild 9-1:	Jahresbilanz umgesetzter und gebundener CO ₂ _{Äqu} -Mengen in Bayern im Jahr 2000.....	109

Tabellenverzeichnis

Tabelle 4-1:	Technische Daten des gewählten Heizwerkes.....	40
Tabelle 4-2:	Biogasertrag aus Tiergülle	42
Tabelle 4-3:	Biogasertrag aus Bio-Abfällen	42
Tabelle 4-4:	Bereitstellung der Kenngrößen bei der Maßnahmenberechnung	46
Tabelle 4-5:	Berechnung von KEA und KEm bei der Maßnahmenberechnung	47
Tabelle 4-6:	Ermittlung der Kosten bei der Maßnahmenberechnung	48
Tabelle 4-7:	Vergleich der Systeme bei der Maßnahmenberechnung.....	49
Tabelle 4-8:	Ergebnisaufzählung bei der Maßnahmenberechnung	49
Tabelle 5-1:	Wohnungs- und Wohnflächenstruktur in Bayern im Jahr 2000.....	51
Tabelle 5-2:	Verteilung der Wohneinheiten über die Baualtersklassen und Gebäudearten in Bayern im Jahr 2000	52
Tabelle 5-3:	Struktur des Wohngebäudebestandes in Bayern im Jahr 2000.....	52
Tabelle 5-4:	Verteilung der Heizungsarten und der Energieträger an den Baualtersklassen in Bayern im Jahr 2000	53
Tabelle 5-5:	Jahresstromverbrauch in Abhängigkeit von der Personenzahl im Haushalt	55
Tabelle 5-6:	Altersstruktur der Zentralheizungskessel in Bayern im Jahr 2000.....	56
Tabelle 5-7:	Anzahl der Erdgas- bzw. Heizöl-Zentralheizungsanlagen in den Kesselbaualtersklassen im EFH in Bayern im Jahr 2000	57
Tabelle 5-8:	Anzahl der Erdgas- bzw. Heizöl-Zentralheizungsanlagen in den Kesselbaualtersklassen im ZFH in Bayern im Jahr 2000.....	57
Tabelle 5-9:	Anzahl der Erdgas- bzw. Heizöl-Zentralheizungsanlagen in den Kesselbaualtersklassen im MFH in Bayern im Jahr 2000	58
Tabelle 5-10:	Anzahl der mit Erdgas und Heizöl befeuerten Heizungsanlagen in den einzelnen Kesselbaualtersklassen in Bayern im Jahr 2000.....	58
Tabelle 5-11:	Aufteilung des Endenergieeinsatzes der bayerischen Haushalte im Jahr 2000	61
Tabelle 5-12:	Aufteilung der CO ₂ -Emissionen der bayerischen Haushalte im Jahr 2000	62
Tabelle 5-13:	Aufteilung der CO ₂ _{Äqu} -Emissionen der bayerischen Haushalte im Jahr 2000	63
Tabelle 5-14:	Energie- und Emissionsbilanz der Haushalte in Bayern für das Jahr 2000.....	63
Tabelle 7-1:	Anteil der Zentralheizungsanlagen und Nahwärmekonzepte beim Kesseltausch.....	68
Tabelle 7-2:	Anteile der jeweiligen Zentralheizungsanlagen beim Ersatz von Altkesseln	68
Tabelle 7-3:	Anteile der Nahwärmekonzepte beim Ersatz von Altkesseln.....	69
Tabelle 7-4:	Geeignete Dachflächen für die Nutzung von Solarenergie	69
Tabelle 7-5:	Potentialabschätzung für Wärmedämmung	70
Tabelle 7-6:	Quervergleich der Potentialabschätzung für Wärmedämmung	71
Tabelle 7-7:	Potentialabschätzung für Heizkesselaustausch.....	72
Tabelle 7-8:	Potentialabschätzung für Kollektoranlagen	72
Tabelle 7-9:	Potentialabschätzung für Kompaktleuchtstofflampen	73
Tabelle 7-10:	Potentialabschätzung mit maximaler PE-Minderung als Kriterium	74
Tabelle 7-11:	Potentialabschätzung für die Zielgröße „maximale CO ₂ -Minderung“.....	74
Tabelle 7-12:	Potentialabschätzung mit minimalen PE-Vermeidungskosten als Kriterium	75

Tabelle 7-13: Potentialabschätzung mit minimalen CO ₂ -Vermeidungskosten als Kriterium	75
Tabelle 7-14: Quervergleich der Potentialabschätzungen.....	76
Tabelle 7-15: Relationen der Potentialabschätzungen, bezogen auf den jeweiligen Maximalwert.....	76
Tabelle 7-16: Ergebnisse der Potentialabschätzungen, bezogen auf Einwohnerzahl.....	77
Tabelle 7-17: Durchschnittliche spezifische Vermeidungskosten der Potentialabschätzungen.....	77
Tabelle 7-18: Veränderte Anteile der Zentralheizungsanlagen bei Altanlagenersatz.....	80
Tabelle 7-19: Potentialabschätzungen aus dem Szenario mit dem veränderten Altanlagenersatz	80
Tabelle 7-20: Potentialabschätzungen aus dem Szenario bei verändertem Strommix.....	81
Tabelle 8-1: Jahresemissionsbilanz für Winterweizen.....	82
Tabelle 8-2: Gebundenes CO ₂ _{phr} in der RME-Kette.....	83
Tabelle 8-3: Energiebedingte CO ₂ und CO ₂ _{Äqu} -Emissionen bei der RME-Herstellung	84
Tabelle 8-4: Biogene und energiebedingte CO ₂ -Emissionen von RME und Diesel	84
Tabelle 8-5: Biogene und energiebedingte CO ₂ _{Äqu} -Emissionen von RME und Diesel	85
Tabelle 8-6: Flächenspezifische CO ₂ -Menge des Stammbaumes "Muttersau"	86
Tabelle 9-1: Anbauflächen, Erträge und Wassergehalte der pflanzlichen Produkte in Bayern im Jahr 2000.....	89
Tabelle 9-2: Spezifischer Energieeinsatz für die Bewirtschaftung von Feld, Acker und Wald	90
Tabelle 9-3: Durchschnittliche spezifische Düngemittelmenge und spezifische Emissionen der Düngemittelherstellung	92
Tabelle 9-4: Spezifische Einsatzmengen in Bayern und spezifische Emissionen bei der PSM-Herstellung	94
Tabelle 9-5: spezifische Saatgutmenge in Bayern, darin gebundene CO ₂ _{phr} -Menge und spez. Emissionen bei der Saatgutherstellung	95
Tabelle 9-6: Erntemenge und CO ₂ _{phr} -Bindung in der Forstwirtschaft in Bayern für das Jahr 2000... 96	
Tabelle 9-7: CO ₂ _{phr} -Bindung in den pflanzlichen Produkten	97
Tabelle 9-8: Inputbilanz von Feld-, Acker- und Waldbewirtschaftung in Bayern für 2000.....	98
Tabelle 9-9: Output-/Bindungsbilanz der Feld-, Acker- und Waldbewirtschaftung in Bayern für das Jahr 2000.....	99
Tabelle 9-10: Anzahl der Tiere und zugehörige Großvieheinheiten in Bayern im Jahr 2000	99
Tabelle 9-11: Spezifischer Energieeinsatz für die Veredelungswirtschaft in Bayern im Jahr 2000... 100	
Tabelle 9-12: Menge und CO ₂ _{phr} -Bindung von Futtermitteln in Bayern im Jahr 2000.....	102
Tabelle 9-13: Abatmung von CO ₂ in der Veredelungswirtschaft in Bayern im Jahr 2000	103
Tabelle 9-14: CO ₂ _{phr} in Exkrementen der Tierhaltung in Bayern im Jahr 2000	104
Tabelle 9-15: CH ₄ -Aussscheidungen in der bayerischen Veredelungswirtschaft im Jahr 2000.....	105
Tabelle 9-16: Bindung in tierischen Produkten in Bayern im Jahr 2000	106
Tabelle 9-17: Inputbilanz der Veredelungswirtschaft in Bayern im Jahr 2000	107
Tabelle 9-18: Output/ Bindungsbilanz der Veredelungswirtschaft in Bayern im Jahr 2000	107
Tabelle 9-19: Gesamtstruktur der Land- und Forstwirtschaft in Bayern im Jahr 2000	108
Tabelle 10-1: Potentialabschätzung für die Land- und Forstwirtschaft	111
Tabelle 10-2: Variationsrechnung fixer Winterweizenanteil.....	112
Tabelle 10-3: Ausgleich der Mehremissionen der Schweinezucht.....	113

Formelverzeichnis

Formel 2-1:	Berechnung des kumulierten Energieaufwandes	14
Formel 2-2:	Berechnung der kumulierten Emissionen	15
Formel 2-3:	Berechnung des CO ₂ -Äquivalentes in dieser Untersuchung	17
Formel 2-4:	Photosynthese Gleichung	17
Formel 2-5:	Berechnung der CO ₂ -Bindungsmenge in Pflanzen	19
Formel 2-6:	Berechnung der jährlichen Abschreibung	20
Formel 2-7:	Berechnung der spezifischen Vermeidungskosten	23
Formel 2-8:	Berechnung der Energieeinsparungsquote	23
Formel 2-9:	Amortisationszeit für vorzeitigen Austausch	25
Formel 2-10:	Amortisationszeit für Systemvergleich	25
Formel 4-1:	Heizenergieeinsparung	32
Formel 4-2:	Berechnung des neuen U-Wertes	33
Formel 4-3:	Leistungszahl des Carnot-Prozesses	36
Formel 4-4:	Berechnung des K(N)RA	48
Formel 5-1:	Berechnung der Bestandszahlen	50
Formel 5-2:	Berechnung der Heizkessel- Bestandszahlen	55
Formel 9-1:	Wassergehalt	88
Formel 9-2:	Berechnung des CO ₂ -Äquivalents beim Energieeinsatz	90
Formel 9-3:	Berechnung des CO ₂ -Äquivalentes durch Düngereinsatz	93
Formel 9-4:	Berechnung des CO ₂ -Äquivalentes durch PSM-Einsatz	93
Formel 9-5:	Berechnung des CO ₂ -Äquivalentes durch Saatgut	94
Formel 9-6:	Berechnung der CO _{2phr} -Bindung durch Forstwirtschaft	96
Formel 9-7:	Berechnung der CO ₂ -Abatmung von in der Tierhaltung	103
Formel 9-8:	Berechnung der CO _{2phr} -Bindung in Exkrementen der Tierhaltung	104
Formel 9-9:	Berechnung der Methanfreisetzung in der Tierhaltung	105

1 Einführung und Zielsetzung

Auch wenn die möglichen Folgen eines anthropogen verursachten Klimawandels nicht genau vorhergesagt werden können kommt der Minderung energiebedingter Treibhausgasemissionen durch rationelle Energienutzung und verstärkte Nutzung erneuerbarer Energien schon allein aus Gründen der Ressourcenschonung allergrößte Bedeutung zu. Die Nutzung und Umsetzung der fossilen Energieträger stellt eine bedeutende Störgröße der Bio- und Atmosphäre dar, welche die Energie-, Strahlungs- und Emissionsbilanz von Siedlungsräumen und bewirtschafteten Flächen mitunter erheblich beeinflusst. Die in den letzten Jahren immer häufiger werdenden Wetterextreme wie Stürme, Trockenheit oder Überschwemmungen sind einzuschätzen als Folgeeffekte eines natürlichen Klimawandels, aber auch als die anthropogenen Energieverbrauchs.

Als wesentlichen Schritt zur Reduzierung der Folgen anthropogenen Handelns verpflichteten sich die unterzeichnenden Staaten im Protokoll von Kyoto aus dem Jahre 1997, ihre treibhauswirksamen Gase im Zeitraum 2008 bis 2012 um insgesamt 5 % unter den Stand von 1990 zu senken, wobei die Einsparung für die einzelnen Staaten von sozialen Gegebenheiten und wirtschaftlichen Gesichtspunkten abhängt.

Die EU hat sich zu einer Minderung ihrer klimawirksamen Emissionen um 8 % verpflichtet. Hierzu wurde jedem Mitgliedsland eine bestimmte Emissionsmenge zugestanden. Die Bundesrepublik Deutschland hat einer Verminderung ihrer klimawirksamen Gase um 21 % zugestimmt, freiwillig sollen sogar 25 % bis zum Jahre 2005 erreicht werden. Das Erreichen dieses Ziels hängt aufgrund der Föderalität maßgeblich von den Landesregierungen der einzelnen Bundesländer ab, so zum Beispiel auch von der Landesregierung des Bundeslandes Bayern.

Der Freistaat Bayern trägt diese Minderungsziele mit, möchte aber die vorhandenen Voraussetzungen und Randbedingungen wie den hohen Durchgangsverkehr durch die geographische Lage oder den um bereits ein Drittel unter dem Bundesdurchschnitt liegenden Pro-Kopf-Ausstoß von CO₂-Emissionen berücksichtigt wissen. Am 17.10.2000 hat die Bayerische Staatsregierung ein Klimaschutzkonzept unter Berücksichtigung dieser speziellen Gegebenheiten beschlossen, das als Ziel die Ausschöpfung der vorhandenen CO₂-Einsparpotentiale unter Beachtung der Kosten-Nutzen-Relation hat. Hiermit soll eine Verminderung der CO₂-Emissionen durch die im Konzept angedachten Maßnahmen von derzeit 90 Mio. Tonnen pro Jahr um 10 Mio. Tonnen pro Jahr bis zum Jahr 2010 erreicht werden [1].

Folgende Schwerpunkte für Maßnahmen zur Treibhausgasreduzierung wurden festgelegt:

- in der Energiewirtschaft die Festhaltung an der Stromerzeugung mit Kernkraft und Ausbau der erneuerbaren Energien,
- in der Industrie zum Beispiel die CO₂-Minderung in energieintensiven Branchen,
- im Verkehrsbereich die Wasserstofftechnologie und Verkehrsleitsysteme,
- im Gebäudebereich die Altbausanierung,
- in der Land- und Forstwirtschaft die stoffliche Nutzung und energetische Verwendung von Biomasse und die Wiederaufforstung von geeigneten Flächen,
- bei der Freizeit und Erholung die Sicherung und Optimierung von wohnortnahen Erholungsgebieten zur Minimierung der Verkehrswege,
- die Vorbildfunktion des Freistaates im Bereich der staatlichen Gebäude und
- High-Tech-Projekte "Klimaschutz" der High-Tech-Offensive Bayern.

Der Klimaschutz stellt insgesamt eine Aufgabe dar, die alle Bereiche des öffentlichen Lebens betrifft und ein vernetztes Handeln im Sinne einer nachhaltigen Entwicklung erfordert, auch wenn das Ausmaß und die Folgen der treibhauswirksamen Emissionen noch nicht eindeutig quantifizierbar sind.

Aufgabenstellung und Zielsetzung

Nachhaltige Maßnahmen zur Minderung von Primärenergiebedarf und Emissionen sollen in erster Linie auf energieintensive und stark emissionsbehaftete Prozesse zielen. Die Art der Maßnahme hängt dabei wesentlich vom Sektor und der Möglichkeit zur Umsetzung innerhalb dieses Sektors ab. So können nur wenige Maßnahmen im Verkehrsbereich leicht umgesetzt werden, die meisten nur mit großen Schwierigkeiten.

Ähnlich sieht es bei der Industrie und teilweise beim Kleinverbrauch aus, da viele heterogene Prozesse nur mit hohem Aufwand verbessert werden können und die Amortisationsdauern nach heutigen Maßstäben zu lang sind. In diesen beiden Bereichen wurden bereits umfassende Untersuchungen zur Minderung von Energieverbrauch und Emissionen durchgeführt.

Anders bei den Haushalten, hier können Maßnahmen bei vielen homogenen „Querschnitts-Technologien“ ohne allzu große technische Schwierigkeiten durchgeführt werden. Gleichzeitig steckt hierin ein großes Potential für die Minderung von Energie und Emissionen, vor allem in der Gebäudebeheizung und –isolierung.

Ein Sonderfall ist die Land- und Forstwirtschaft, in der normalerweise nur die Emissionen durch den Energieeinsatz, nicht aber das durch Photosynthese aus der Atmosphäre in die Pflanzen eingebundene CO₂ bilanziert wird. In dieser Untersuchung soll versucht werden, mit Zahlen und Fakten ein Datengerüst analog der Input-Output-Analyse in der Industrie für die Land- und Forstwirtschaft zu erstellen. Die Verflechtung von Nahrungs- und Futtermittel-Produktion im Hinblick auf CO₂-Be- oder Entlastungen ist dabei von besonderem Interesse. Mit diesem Datengerüst sollen szenarische Untersuchungen zur Minderung von Energie und Emissionen untersucht werden.

Das Ziel dieser Arbeit ist die lebenszyklische Berechnung von möglichen, kosten- und ressourcenoptimierten Maßnahmen zur Reduzierung von Primärenergieverbrauch und Emissionen im Freistaat Bayern. Die Aufstellung von detaillierten Strukturanalysen für die Sektoren Haushalte und Land- und Forstwirtschaft, unter Berücksichtigung des von Pflanzen gebundenem Kohlendioxides, bildet die Basis für die darauf aufbauende Abschätzung von Einsparpotentialen für Energie und Emissionen in diesen Bereichen.

2 Definitionen und Methodik

2.1 Vorgehensweise

Die Strukturanalyse und die Ausweisung von möglichen Einsparpotentialen erfolgt in der vorliegenden Arbeit, deren Struktur und Aufbau in **Bild 2-1** als Übersicht dargestellt wird, getrennt für die beiden Sektoren Haushalte und Land- und Forstwirtschaft.

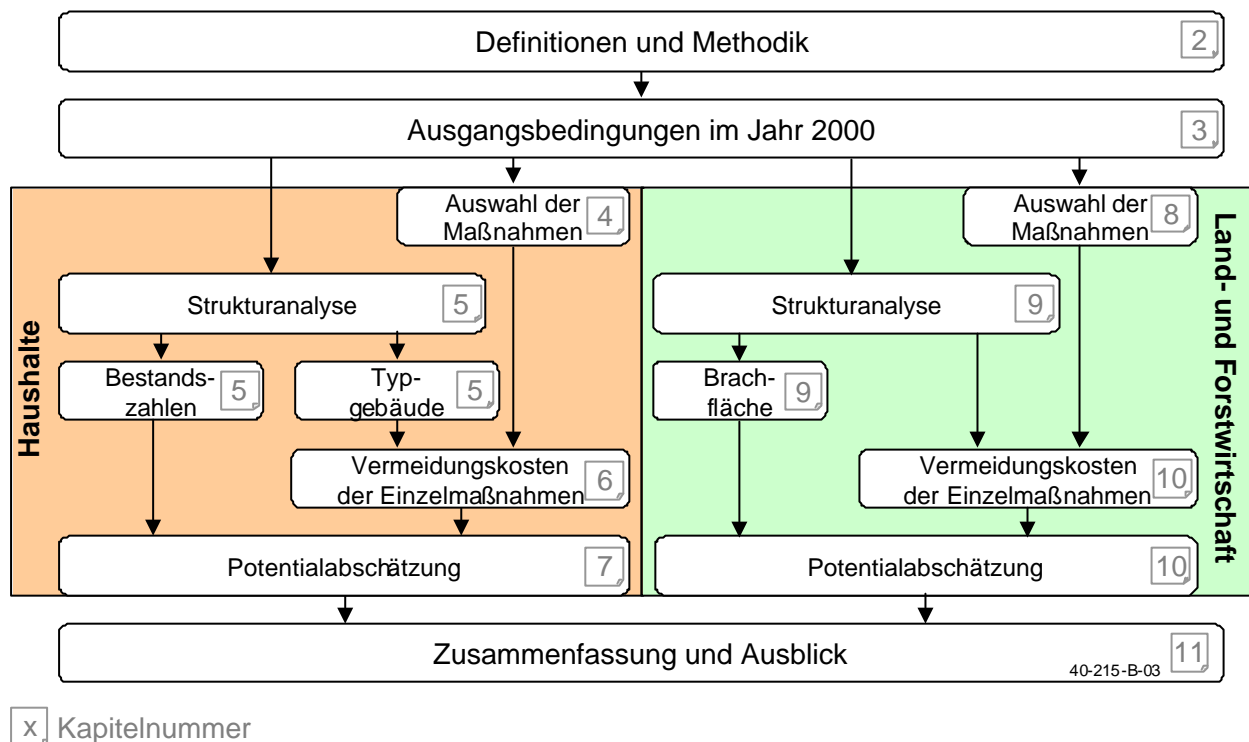


Bild 2-1: Struktur und den Aufbau der vorliegenden Arbeit

Nach dem Kapitel zu *Definitionen und Methoden* wird im Kapitel „*Ausgangsbedingungen im Jahr 2000*“ auf den Hintergrund dieser Untersuchung hingeführt. Nach diesem Kapitel teilt sich die Arbeit auf in die Bereiche Haushalte und Land- und Forstwirtschaft.

Die *Auswahl der Maßnahmen* aus der sehr großen Fülle an Möglichkeiten erfolgt im Bereich **Haushalte** vor dem Hintergrund, dass auf der einen Seite möglichst praxisrelevante Maßnahmen ausgewählt werden, auf der anderen Seite aber auch zukünftige Techniken zum Zuge kommen. Gleichzeitig werden in diesem Kapitel die Algorithmen für die allgemeine Berechnung der Maßnahmen aufgezeigt. Mit Hilfe der Ausgangsbedingungen wird im nächsten Arbeitsschritt eine *Strukturanalyse* des Haushaltssektors durchgeführt, aus der Bestandszahlen und Typgebäude als Ergebnis gewonnen werden. Auf diese Typgebäude werden ausgewählte Maßnahmen angewandt und typische *Vermeidungskosten der Einzelmaßnahmen* berechnet.

Als nächstes werden die Bestandszahlen nach Typgebäuden und Einzelmaßnahmen gewichtet, um so kumulierte *Potentialabschätzungen* für die Einsparung von Energie und treibhauswirksamen Emissionen zu erhalten.

Im Bereich **Land- und Forstwirtschaft** werden im Kapitel *Auswahl der Maßnahmen* Möglichkeiten zur Reduzierung von Energie und treibhauswirksamen Emissionen aufgezeigt. Aus der *Strukturanalyse* und den ausgewählten Maßnahmen werden die *Vermeidungskosten der Einzelmaßnahmen* berechnet, welche mit Daten aus der Strukturanalyse über die *Brachflächen* in Bayern zu einer *Potentialabschätzung* hochgerechnet werden.

Abschließend wird eine Zusammenfassung über beide Bereiche vorgenommen und Ansatzpunkte für nachfolgende Arbeiten aufgezeigt.

Alle Arbeiten stützen sich auf verschiedene Instrumente und Werkzeuge, die in diesem Kapitel eingehend erläutert werden. Die Berechnung der möglichen Maßnahmen erfolgt mit Hilfe der Lebenszyklusbetrachtung, bei der nicht nur die Nutzungsphase der eingesetzten Energieträger und Maßnahmen, sondern auch die Herstellung und die Entsorgung derselben betrachtet werden.

Mit Hilfe der Bottom up-Methode, bei der Daten von einzelnen Bereichen hierarchisch von unten nach oben kumuliert werden bis der Wert der Gesamtgröße erreicht ist, werden der Energieverbrauch und die treibhauswirksamen Emissionen der Haushalte sowie der Land- und Forstwirtschaft ermittelt.

2.2 Untersuchungsrahmen

Die Auswahl von kosten- und ressourcenoptimierten Maßnahmen erfolgt aus einem kombinierten Verfahren, dessen Grundzüge durch die VDI-Richtlinie 4600 "Kumulierter Energieaufwand – Begriffe, Definitionen, Berechnungsmethoden" [7] vorgegeben sind. Darauf aufbauend werden Emissionen und Kosten quantifiziert, bevor daraus die Auswahlkriterien Vermeidungskosten, Amortisationszeit und Erntefaktor errechnet werden.

Bei der ganzheitlichen Systemuntersuchung der einzelnen Maßnahmen und Techniken muss für die Vergleichbarkeit und eine fundierte Aussagekraft der Untersuchungsrahmen festgelegt werden. Hierbei werden folgende Aspekte berücksichtigt:

- Referenzsystem
- Bewertungskriterien
- Bezugsgrößen
- Systemgrenzen (Bilanzraum, -zeit und -grenze)
- Sinnvolle Alternativen für die zu untersuchenden Maßnahmen und Techniken

Referenzsystem

Aussagen über die Effizienz von Maßnahmen können nur im Vergleich gegenüber konventionellen und allgemein üblichen Techniken erfolgen, weswegen für diese Untersuchung die in den Gebäuden und Wohnungen vorhandenen Systeme als Referenzsysteme gewählt werden. Für diese Referenzsysteme muss deshalb ebenfalls eine ganzheitliche Bilanz in Bezug auf Energieverbrauch, Emissionen und Kosten erstellt werden.

Bei den Referenzsystemen muss es sich um aktuell marktgängige Systeme handeln, Sonder- oder Spezialausführungen werden nicht berücksichtigt. Ferner sollen sie üblichen Leistungsklassen und dem aktuellen Stand der Technik entsprechen.

Bewertungskriterien

Eine ganzheitliche Systemuntersuchung umfasst die energetischen und emissionsbehafteten Umwandlungsvorgänge und die zugehörigen monetären Aufwendungen.

Im Rahmen dieser Studie werden die maßgeblichen Größen für eine ökologische und ökonomische Beurteilung der Lebenswege ermittelt. Im Speziellen sind dies der Kumulierte Energieaufwand (KEA), die kumulierten Emissionen (KE_m), die spezifische Vermeidungskosten k_v , Einsparquoten und Amortisationszeiten, welche alle in den folgenden Unterkapiteln 2.3 bis 2.7 beschrieben werden.

Bezugsgrößen

Als Bezugsgrößen für diese Untersuchung werden Kennzahlen aus dem Kalenderjahr 2000 verwendet. Alle verwendeten Statistiken und sonstigen Quellen werden für dieses Jahr ausgewertet. Stehen Daten oder Kenngrößen nicht zur Verfügung, werden entweder die Gegebenheiten der vorangegangenen Jahre herangezogen oder die entsprechenden Werte auf das Jahr 2000 hochgerechnet.

Im einzelnen werden aus den Statistiken und sonstigen Quellen folgende Größen ausgewertet:

- Endenergieverbrauch
- Energiebedingte Emissionen (absolut und spezifisch)
- Bestandszahlen (Wohngebäude- und Wohnungsbestand, Einwohnerzahl, Tierbestand)
- Flächennutzung der Land- und Forstwirtschaft
- Art und Menge der pflanzlichen und tierischen Erzeugung

Systemgrenzen

Für die Bilanzierung wird im Folgenden der Bilanzraum Bayern gewählt. Prozesse, die außerhalb Bayerns stattfinden, werden dann bilanziert, wenn importierte Produkte in Bayern Verwendung finden, um die hierdurch verursachten Energie- und Emissionsmengen vollständig zu erfassen. Dies gilt analog für die Bereitstellungsnutzungsgrade der Endenergieträger.

Alle untersuchten Systeme werden über ihre gesamte technische Lebensdauer untersucht, wobei der Nutzungsgrad und der Wartungsaufwand im Mittel über diesen Zeitraum als konstant angesehen werden.

Werden in Bayern produzierte Produkte exportiert, so müsste diesen eine Gutschrift für Energie oder Emissionen zugeteilt werden, da mit diesen Gütern rechnerisch eine Energie- oder Emissionsmenge exportiert wird. Auf lebenszyklischen Betrachtungen basierte Aussagen über Energie- oder Emissionsminderungen können nur unter Berücksichtigung aller energetischen Aufwendungen und Emissionen entlang der gesamten Kette gemacht werden. In dieser Untersuchung wird deshalb diese Gutschrift nicht verwendet, da die bei der Herstellung benötigte Energie und die dabei freiwerdenden Emissionen durch diese Produkte verursacht und in Bayern verbraucht bzw. freigesetzt werden, einzige Ausnahme bildet der Export von Winterweizen (Kapitel 8.1).

Unterscheidung zu IKARUS

IKARUS ist ein Instrumentarium für Klimagas-Reduktionsstrategien, dessen Struktur als gesamtwirtschaftliches Modell den Energiefluss der Bundesrepublik Deutschland abbildet. IKARUS soll die Analyse künftiger energiewirtschaftlicher und technischer Entwicklungen wie Effizienzsteigerungen unter

Berücksichtigung der zukünftigen Nachfrage nach Energiedienstleistungen (zum Beispiel Industrieproduktion, Personenkilometer) ermöglichen.

Das vom Forschungszentrum Jülich entwickelte IKARUS-Optimierungsmodell bildet das Energiesystem der Bundesrepublik Deutschland in Form vernetzter Prozesse ab, wie die Gewinnung oder der Import von Primärenergie, die Umwandlung in Sekundärenergie (zum Beispiel Stromerzeugung) und deren Verteilung und schließlich die Nutzung beim Endverbraucher. Dabei werden die Vielzahl der Optionen für verschiedene Techniken, die zugehörigen spezifischen Emissionen, die individuellen Kosten sowie die möglichen Vernetzungen der Energieflüsse erfasst.

Neben ökonomischen und technischen Daten werden relevante energiepolitische Rahmenbedingungen (zum Beispiel Umfang der inländischen Steinkohleförderung) berücksichtigt. Die Nachfrage nach Energiedienstleistungen ist im optimierenden Modell die "treibende Kraft" und muss erfüllt werden. Mit der Linearen Programmierung wird die Befriedigung des zukünftigen Energiebedarfs im Modell unter volkswirtschaftlich minimierten Kosten zur Einhaltung der gesetzten energie- und umweltpolitischen Ziele erreicht. Dabei werden Art und Menge der zu verwendenden Energieträger, Typ und Kapazität der Energietechniken sowie die entstehenden Gesamtkosten ausgewiesen [8].

Die in der vorliegenden Untersuchung entwickelte Optimierung dagegen trifft die Auswahl der Maßnahmen nach vorgegeben Optimierungsansätzen, die nicht auf volkswirtschaftliche Parameter, sondern auf konkrete Ziele wie maximale Verbrauchsreduzierung oder minimale Kosten ausgerichtet sind.

Erstmals werden Potentiale für den Freistaat Bayern ausgewiesen, wobei lebenszyklische Betrachtungen der untersuchten Maßnahmen herangezogen werden. Vernetzungen mit anderen Prozessen erfolgen nur unter Berücksichtigung der vorgelagerten Ketten, Auswirkungen durch veränderten Energiebedarf bleiben unberücksichtigt. Ähnlich wie in IKARUS werden die spezifischen und absoluten Emissionen und Kosten, aber auch die Einsparung an Primärenergie ausgewiesen.

2.3 Kumulierter Energieaufwand

Nach der 1998 veröffentlichten VDI-Richtlinie 4600 gibt der Kumulierte Energieaufwand (KEA) die Gesamtheit des primärenergetisch bewerteten Aufwandes an, der im Zusammenhang mit der Herstellung, Nutzung und Beseitigung eines ökonomischen Gutes (Produktes oder Dienstleistung) entsteht bzw. dieser ursächlich zugewiesen werden kann. Er stellt somit die Summe (**Formel 2-1**) der lebenszyklisch kumulierten Energieaufwendungen für die Herstellung (KEA_H), die Nutzung (KEA_N) und die Entsorgung (KEA_E) eines Gegenstandes dar. Dabei werden alle Fertigungs-, Hilfs- und Betriebsstoffe sowie Betriebsmittel und Ersatzteile einschließlich Transportaufwendungen für Gegenstände und Dienstleistungen berücksichtigt [7].

Als Bilanzgrenze gilt die gesamte Ökosphäre, also von der Lagerstätte bis zur Endlagerung. Mit Hilfe des KEA ist eine einheitliche energetische Bilanzierung von unterschiedlichsten Maßnahmen und Techniken möglich.

Die Aufwendungen zur Herstellung bzw. Bereitstellung und zur Entsorgung erfolgen in der Regel außerhalb der Bilanzgrenze und werden somit als vorgelagerte (bzw. nachgelagerte) Aufwendungen bezeichnet. Sie werden zur Förderung, zur Aufbereitung und zum Transport der jeweiligen Güter und Stoffe benötigt. Die Zahlenwerte dieser vorgelagerten Aufwendungen stammen aus [9], die nach methodisch gleicher Vorgehensweise für alle Stoffe, Prozesse und Prozessketten Energie- und Emissionsdaten mit der zugehörigen Dokumentation enthält.

Beim Technikvergleich werden zusätzlich kumulierte regenerative (KRA) und kumulierte nichtregenerative (KNRA) Aufwendungen ausgewiesen, mit denen eine eindeutige Zuordnung der Primärenergie zu nachwachsenden bzw. fossilen Energieträgern erfolgen kann. Für Berechnung der Einsparungen wird aber nur der KNRA wegen Nachhaltigkeitsgründen herangezogen.

Formel 2-1: Berechnung des kumulierten Energieaufwandes

$$\begin{aligned}
 &KEA = KEA_H + KEA_N + KEA_E \\
 &KEA = \sum_{i=1}^n \frac{EE_i}{b_i} + \sum_{j=1}^n \frac{NEV_j}{b_j} + \sum_{k=1}^n \frac{SEI_k}{b_k} \\
 &KEA = KRA + KNRA
 \end{aligned}$$

mit

- $EE_i =$ Endenergieverbrauch
- $NEV_j =$ Nichtenergetischer Verbrauch
- $SEI_k =$ Stoffgebundener Energieinhalt
- $b_{i,j,k} =$ jeweiliger Bereitstellungsnutzungsgrad
- $KRA =$ kumulierter regenerativer Aufwand
- $KNRA =$ kumulierter nicht-regenerativer Aufwand

Soweit vorhanden, werden Werte bekannter Quellen verwendet; in Einzelfällen können die Zahlenangaben nur über Masse/ Gewicht und die zugehörige stoffliche Zusammensetzung ermittelt werden. Ein vorzeitiger Austausch älterer Systeme (siehe Kapitel 2.7) stellt einen Sonderfall für die Berechnung des Kumulierten Energieaufwandes dar, da bei einem frühzeitigen Austausch eines Systems die anteiligen energetischen Aufwendungen für Herstellung und Entsorgung für die Restlebensdauer dem neuen System angerechnet werden müssen.

Die Ertüchtigung einer bestehenden Anlage durch Austausch von wenigen Teilen führt in den meisten Fällen zu einer Verlängerung der Lebensdauer der gesamten Anlage, jedoch wird hierdurch in der Regel keine große energetische, emissionsmäßige oder gar monetäre Verbesserung der Gesamtanlage erreicht, so dass dieser Fall für diese Untersuchung ausgeschlossen wird.

2.4 Kumulierte Emissionen

Die Auswahl von Systemen erfolgt aufgrund der Diskussion um die Treibhausgasproblematik immer mehr unter dem Gesichtspunkt der durch sie verursachten Emissionen. Von entscheidender Bedeutung sind dabei nicht nur die Emissionen während des Betriebs eines Systems, sondern auch die während der Herstellung und Nutzung desselben, so dass die Berechnung der Emissionen analog zur Ermittlung des KEAs erfolgt. Die Summe dieser Emissionen (**Formel 2-2**) werden als kumulierte Emissionen (KE_m) bezeichnet.

Zusätzlich werden die kumulierten Emissionen in direkte, d.h. innerhalb des Bilanzraumes auftretende, und vorgelagerte, d.h. außerhalb des Bilanzraumes erfolgende, Emissionen unterschieden. Zu den vorgelagerten Emissionen werden auch die bei der Herstellung und der Entsorgung von Maßnahmen entstehenden gezählt, da diese bei der Bilanzierung der Produktions- bzw. Entsorgungsbetriebe berücksichtigt werden.

Formel 2-2: Berechnung der kumulierten Emissionen

$$KEm = KEm_H + KEm_N + KEm_E$$

$$KEm = \sum_{i=1}^n (EE_i * e_i) + \sum_{j=1}^n (NEV_j * e_j) + \sum_{k=1}^n (SEI_k * e_k)$$

mit

- KEm = Kumulierte Emissionen
 EE_i = Endenergieverbrauch
 NEV_j = Nichtenergetischer Verbrauch
 SEI_k = Stoffgebundener Energieinhalt
 e_{i,j,k} = spezifischer Emissionsfaktor

Im Rahmen dieser Studie werden auf Grundlage eigener Berechnungen und verschiedener Quellen Emissionen für CO₂, CH₄ und N₂O ausgewiesen. Mit nachfolgender Methodik werden die kumulierten Emissionen für Kohlendioxid berechnet, die für Methan und Lachgas werden mit Hilfe von prozessspezifischen Kennwerten aus verschiedenen Quellen bestimmt. Hierzu werden für jede Maßnahme die zusammengetragenen Werte nachvollziehbar abgelegt und auf Plausibilität überprüft.

Der Treibhauseffekt [10]

Die Oberfläche der Erde und ihre Atmosphäre werden von der Sonne durch kurzwellige elektromagnetische Strahlung erwärmt, die teilweise als langwellige Strahlung von der Erdoberfläche zurückgestrahlt wird. In sechs Kilometern Höhe beträgt die globale Mitteltemperatur etwa -19°C, auf der Erdoberfläche hingegen im Schnitt +15°C. Diese Temperaturdifferenz entsteht durch den Treibhauseffekt der klimawirksamen Gase, durch den in der Atmosphäre enthaltenen Wasserdampf und durch die Wolken.

Die Rolle dieser Gase lässt sich am besten mit Hilfe eines Treibhauses erklären. Sichtbares Licht wird von der Sonne durch die Glasscheiben in das Treibhaus gestrahlt. Dieses Licht, das teilweise an der Außenseite des Glases reflektiert wird, tritt entsprechend der Transmissionsfähigkeit des Glases in das Innere ein. Beim Durchtritt durch das Glas wird ein Teil des Lichtes absorbiert und in Wärme umgewandelt. Dieses transmittierte Licht wird von den im Inneren befindlichen Körpern absorbiert, wobei diese sich erwärmen. Sie geben dann langwellige Strahlung in Form von Wärme ab. Das Glas verhindert eine vollständige Rückstrahlung durch Reflexion nach innen und Absorption dieser langwelligen Strahlung. Dadurch erhöht sich die Temperatur im Inneren des Treibhauses allmählich.

Die Rolle des Glases übernehmen in der Atmosphäre die klimawirksamen Gase und ermöglichen somit ein Leben auf der Erde, die ohne diese Gase fast vollständig vereist wäre. 90 % dieses natürlichen Treibhauseffektes wird von Wasserdampf, von den Wolken und von CO₂ verursacht, die restlichen 10 % durch die anderen Spurengase wie CH₄, N₂O oder Ozon.

Erhöht sich nun die Konzentration dieser Spurengase, so hat dies unmittelbar Folgen auf den Strahlungshaushalt der Erde, da diese Gase ein starkes Potential zur Absorption von langwelligen Strahlen aufweisen. Die Erde nimmt dadurch mehr Energie auf als sie wieder abgibt. Die Folge ist eine langsame Erwärmung der Erde.

Kohlendioxid

Kohlendioxid wird bei der Verbrennung von fossilen Brennstoffen wie Kohle, Öl und Gas freigesetzt. Es entsteht durch die Anlagerung von zwei Sauerstoffatomen an den Kohlenstoff während des Oxidationsvorganges unter Abgabe von Energie (Wärme).

Aufgrund seiner langen Verweilzeit in der Atmosphäre von etwa 100 Jahren ist das Kohlendioxid gleichmäßig über die gesamte Lufthülle der Erde verteilt. Die CO_2 -Konzentration unterliegt einem jährlichen Zyklus; so ist die Konzentration im globalen Mittel im April um einige ppm höher als im Oktober. Der Grund dafür ist die verstärkt einsetzende Photosynthese der Pflanzen der nördlichen Erdhalbkugel, da hierdurch der Atmosphäre CO_2 entzogen wird. Im Herbst und Winter kehrt sich dieser Vorgang wieder um, weil das in den Pflanzen gebundene Kohlendioxid durch Zersetzungsprozesse wie Verrottung von Laub oder ähnliches wieder freigesetzt wird [10].

Basis für die Berechnung stellt hierbei der Endenergiebedarf dar. Der Heizwert der Energieträger wird nach der empirischen Verbandsformel über die Elementarzusammensetzung aus [11] errechnet. Die kumulierten CO_2 -Emissionen werden mit den Algorithmen der Verbrennungsrechnung ermittelt.

Für den Mix an elektrischer Energie können die zugehörigen Emissionen aus dem Brennstoff der zur Stromerzeugung eingesetzten Kraftwerke über den Strommix, die Verteilungsverluste und die Nutzungsgrade rückgerechnet werden.

Mit dem gewählten Berechnungsansatz können für CO_2 nur die maximalen Emissionswerte ermittelt werden, da von einer vollständigen Verbrennung ausgegangen wird. Anlagen zur Rauchgasentschwefelung oder Rauchgasentaschung werden im Bedarfsfall gesondert berücksichtigt.

Bei der Verbrennung nachwachsender Rohstoffe oder deren Produkte werden die CO_2 -Emissionen nicht bilanziert, da dieses freigesetzte CO_2 während der Aufwuchsphase durch die Photosynthese in der Pflanze gebunden wurde. Bei natürlichem Verrottungsvorgang würde die gleiche Menge an CO_2 auch wieder freigesetzt werden, jedoch in einem viel längeren Zeitraum.

Methan

Methan entsteht hauptsächlich bei der Verdauung von Pflanzenfressern sowie beim Abbauprozess auf Deponien. Hauptquelle ist die Land- und Forstwirtschaft, aber auch die Industrie. Die höchsten Methanemissionen entstehen auf natürliche Weise in biologisch aktiven, anaeroben Bereichen in Feuchtgebieten oder Mooren. Die größte anthropogene Quelle ist die Landwirtschaft, bei der als Hauptverursacher für Methanemissionen der Reisanbau in den tropischen und subtropischen Regionen Asiens oder die zunehmende Rinderhaltung zu nennen sind.

Die Klimawirksamkeit von Methan beruht auf der Absorption von bestimmten Wellenlängen aus dem Infrarot-Spektrum. Es hat gegenüber CO_2 die 21-fache Wirkung bei einem Zeithorizont von 100 Jahren, wobei das Methan selbst nur zwischen 9 und 18 Jahren in der Atmosphäre verweilt.

Lachgas

Distickstoffmonoxid (N_2O), auch als Lachgas bekannt, besitzt die Eigenschaft, bestimmte Wellenlängen aus dem Infrarot-Spektrum zu absorbieren und damit den Treibhauseffekt zu fördern. Gleichzeitig führt der photochemische Abbau von N_2O in der Stratosphäre zu ozonschädigenden Reaktionsprodukten. Gegenüber CO_2 besitzt N_2O eine 320-fache Klimawirkung bei Betrachtung eines Zeithorizontes von 100 Jahren, wobei das N_2O eine Verweilzeit von etwa 120 Jahren in der Atmosphäre besitzt.

Die größten Quellen für Lachgas sind mikrobiologische Prozesse bei der Umsetzung von organischen und mineralischen Stickstoffverbindungen in Böden (durch Düngung in der Landwirtschaft) und Gewässern. Der Anstieg des Stickstoff-Düngerverbrauches in der Landwirtschaft in den vergangenen Jahrzehnten zog nicht nur die bekannten Folgen wie die Nitratbelastung des Grundwassers oder die Übersäuerung des Bodens nach sich, sondern auch einen starken Anstieg der Lachgas-Emissionen.

CO₂-Äquivalent

Für die Vergleichbarkeit der Maßnahmen auf Basis der untersuchten Emissionen CO₂, CH₄ und N₂O wird das Treibhausgaspotential herangezogen. Hierbei wird jedem Treibhausgas eine Bewertungszahl zugeordnet, das sogenannte Treibhausgaspotential THP (englisch: Global Warming Potential GWP). Dieses ist abhängig von der Fähigkeit eines Gases zur Absorption infraroter Strahlen und von der Lebensdauer des Gases in der Atmosphäre.

So kann ein Molekül Methan 30-mal mehr Energie absorbieren als ein Molekül Kohlendioxid. Für die Klimawirksamkeit sind jedoch nicht nur unterschiedliche Molekülstrukturen von Bedeutung, sondern auch die Wechselwirkungen untereinander.

Die Summe aus den gewichteten Emissionsarten nach **Formel 2-3** wird als CO₂-Äquivalent bezeichnet:

Formel 2-3: Berechnung des CO₂-Äquivalentes in dieser Untersuchung

$$\text{CO}_{2\text{Äqu}} = \text{CO}_2 + 21 \cdot \text{CH}_4 + 320 \cdot \text{N}_2\text{O} \quad [\text{kg}]$$

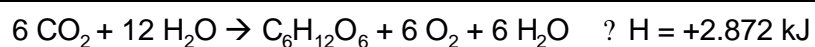
2.5 Bindungsmechanismen von Kohlendioxid durch Photosynthese

Kohlendioxid entsteht durch die Anlagerung von zwei Sauerstoffatomen an den Kohlenstoff während des Oxidationsvorganges unter Abgabe von Energie (Wärme). Der umgekehrte Vorgang, die Reduktion von CO₂ in Sauerstoff und Kohlenstoff, benötigt Energie und geschieht als Photosynthese in Pflanzen. Der bei der Photosynthese entstehende Sauerstoff wird von den Pflanzen über die Blätter bzw. Nadeln wieder abgegeben, der Kohlenstoff hingegen wird in den Pflanzen als Kohlenhydrate, Eiweiße (Proteine) und Fette eingespeichert.

Der Vorgang der CO₂-Bindung – die Photosynthese

Alle grüne Pflanzen können durch die Photosynthese aus Kohlendioxid und Wasser Traubenzucker und Sauerstoff herstellen. Chemisch gesehen handelt es sich um eine Reduktion von Kohlendioxid zu Glucose; jedes C-Atom eines Kohlendioxidmoleküls nimmt dabei zwei Wasserstoffatome auf (Reduktion durch H-Aufnahme). Diese Reduktion ist eine endotherme Reaktion, d.h. es muss der Pflanze Energie zugeführt werden.

Formel 2-4: Photosynthesegleichung



Die Faktoren, die diesen Prozess beeinflussen, sind die Konzentrationen der Ausgangsstoffe, die Qualität und Quantität des Lichtes sowie die Temperatur. Indirekt wird die Photosyntheserate natürlich von allen wichtigen Umweltfaktoren beeinflusst, wie zum Beispiel dem Salzgehalt des Bodens.

Bestimmung des Kohlenstoffgehaltes von Pflanzen und Tieren

Pflanzen und Lebewesen setzen sich im wesentlichen aus Wasser, Kohlenhydraten, Proteinen und Fetten zusammen, je nach Pflanze oder Lebewesen zu unterschiedlichen Anteilen und Untergruppen. Sofern der Kohlenstoffgehalt einzelner Pflanzen und Tiere aus der Literatur nicht ermittelbar war, wurde er aus den Bausteinen berechnet. Für diese Berechnung wird für die einzelnen Bausteine folgende Methodik angewandt.

Kohlenhydrate

Der Kohlenstoff liegt bei den Kohlenhydraten als Polymer aus Glucose vor, zu denen unter anderem Stärke, Cellulose etc. zählen. Der Einfachheit halber wird die Formel des Disaccharids Lactose zur Bestimmung des Kohlenstoffanteil aller Kohlenhydrate ($C_{12}H_{22}O_{11}$) verwendet. Über die Molgewichte der einzelnen Atome (C = 12 mol, H = 1 mol und O = 16 mol) kann das Molgewicht des Lactose-Moleküls wie folgt bestimmt werden:

$$12 \cdot C + 22 \cdot H + 11 \cdot O = 12 \cdot 12 \text{ mol} + 22 \cdot 1 \text{ mol} + 11 \cdot 16 \text{ mol} = 342 \text{ mol}$$

Der Kohlenstoffanteil errechnet sich aus dem Quotienten von Kohlenstoffgewicht und Molekulgewicht:

$$\frac{\text{Kohlenstoffgewicht}}{\text{Molekulgewicht}} = \frac{12 \cdot 12 \text{ mol} \cdot 100}{342 \text{ mol}} = 42,1 \%$$

Proteine

Bei den Proteinen ist die Berechnung aufwendiger, da sie sich aus 20 Aminosäuren mit einer unterschiedlichen Anzahl von C-, H-, O-, N- und S- Atome zusammensetzen. Vereinfachend wird hier das Mittel über alle Aminosäuren gebildet und man erhält die chemische Formel für die Modellaminosäure: $C_{5,35} H_{9,85} N_{1,35} O_{2,35} S_{0,15}$

Das durchschnittliche Molgewicht der Aminosäure wurde mit den Molgewichten der einzelnen Atome (mit der Ergänzung der Angaben bei Kohlenhydrate um N = 14 und S = 32) wie folgt bestimmt:

$$5,35 \cdot 12 \text{ mol} + 9,85 \cdot 1 \text{ mol} + 1,35 \cdot 14 \text{ mol} + 2,35 \cdot 16 \text{ mol} + 0,15 \cdot 32 \text{ mol} = 135,35 \text{ mol}$$

Der Kohlenstoffanteil errechnet sich analog zu den Kohlenhydraten zu:

$$\frac{\text{Kohlenstoffgewicht}}{\text{Molekulgewicht}} = \frac{5,35 \cdot 12 \text{ mol} \cdot 100}{135,5 \text{ mol}} = 47,4 \%$$

Fette

Bei den Fetten wird von den wichtigsten Fettsäuren ausgegangen und eine Modell-Fettsäure gebildet: $C_{21,58} H_{36,3} O_{2,08}$. Daraus wird dann das Molgewicht berechnet:

$$21,58 \cdot 12 \text{ mol} + 36,3 \cdot 1 \text{ mol} + 2,08 \cdot 16 \text{ mol} = 328,54 \text{ mol}$$

Der Kohlenstoffanteil errechnet sich analog zu den Proteinen zu:

$$\frac{\text{Kohlenstoffgewicht}}{\text{Molekülgewicht}} = \frac{21,58 * 12 \text{ mol} * 100}{328,54 \text{ mol}} = 78,8 \%$$

Mit diesen Kohlenstoffanteilen der Bausteine und dem Gewichtsanteil der Bausteine an der Gesamtpflanze bzw. dem Tier kann nun der Kohlenstoffgehalt errechnet werden.

Hierzu werden die Kohlenstoffanteile der Bausteine mit den entsprechenden Gewichtsanteilen multipliziert und daraus die Summe gebildet. Man erhält somit den Kohlenstoffgehalt der Pflanze bzw. des Tieres.

Kohlendioxidbindung

Wie bereits erwähnt, entsteht der Kohlenstoff durch Reduktion von Kohlendioxid in der Pflanze. Bei bekanntem Kohlenstoffanteil ist es daher möglich, die absolute Menge an gebundenem Kohlenstoff m_{CO_2} zu errechnen. Hierzu wird die Erntemenge m_{Ernte} pro ha bzw. kg Lebendgewicht mit dem Anteil der Trockensubstanz $(1 - w_{\text{Ernte}})$ multipliziert, um die Trockenmasse pro Einheit zu bekommen. Diese wird mit dem Anteil des in der Pflanze enthaltenen Kohlenstoffs a_c und dem Quotienten aus Molgewicht von Kohlendioxid in Höhe von $(1 * 12 \text{ mol} + 2 * 16 \text{ mol} =) 44 \text{ mol}$ und dem Molgewicht von Kohlenstoff in Höhe von 12 mol multipliziert, um das Gewicht des durch die Pflanze bzw. durch das Tier "gebundenen" Menge an Kohlendioxid zu bestimmen:

Formel 2-5: Berechnung der CO₂-Bindungsmenge in Pflanzen

$$m_{\text{CO}_2} = m_{\text{Ernte}} * (1 - w_{\text{Ernte}}) * a_c * 44/12 \quad [\text{kg}_{\text{CO}_2\text{pflr}}/\text{ha oder kg}_{\text{CO}_2\text{pflr}}/\text{kg}]$$

mit m_{CO_2} = photosynthetisch reduziertes CO₂
 m_{Ernte} = Erntemenge pro ha bzw. kg Lebendgewicht
 w_{Ernte} = Wassergehalt der Erntemenge bzw. des Lebendfleisches
 a_c = in der Trockensubstanz der Pflanze enthaltener Kohlenstoffanteil
 $44/12$ = anrechenbares molares Kohlendioxidgewicht

Diese Kohlenstoffmenge wird zukünftig als photosynthetisch reduziertes CO₂ bzw. als CO_{2pflr} bezeichnet.

Besonderheiten bei der Berechnung der Kohlendioxidbindung:

Bei Pflanzen werden nur die gebundenen Mengen an Kohlendioxid in den Erntemengen berücksichtigt, da die anderen Bestandteile wie Wurzelwerk, Rinde, Äste auf dem Feld bzw. im Wald verbleiben und dort das in ihnen gebundene CO_{2pflr} durch Verrottung wieder abgeben. Ähnliches gilt auch für den durch die Pflanze im Boden gebundenen Kohlenstoff, der innerhalb kurzer Zeit wieder zu CO₂ oxidiert wird.

Für die Berechnung des in Fleisch von Tieren gebundenen Kohlendioxides werden nur die Schlachtgewichte der Tiere herangezogen, das heißt ohne Innereien, Füße, Köpfe, Felle, Federn oder Ähnlichem.

2.6 Kumulierte Kosten

In analoger Weise zur ganzheitlichen Betrachtung werden bei der ökonomischen Analyse zunächst die Kosten für die einzelnen Posten separat ermittelt. Um eine Vergleichbarkeit zu gewährleisten, müssen die gleichen Basisdaten und Rahmenbedingungen zugrunde gelegt werden. Zu beabsichtigen sind die folgenden Kostenbestandteile:

Investitionskosten

Die Investitionen I der untersuchten Maßnahmen werden aus den angegebenen Quellen ermittelt und gegebenenfalls um die Mehrwertsteuer ergänzt. Sie werden anschließend mit einem einheitlichen Zinssatz z annuitätisch über die technische Lebensdauer L abgeschrieben. Als Ergebnis erhält man die jährlichen Kapitalkosten k :

Formel 2-6: Berechnung der jährlichen Abschreibung

$$k = I \cdot (1+z)^L \cdot \frac{(1+z) - 1}{(1+z)^L - 1} \text{ [€/a]}$$

Förderprogramme wie das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) werden dahingehend berücksichtigt, dass die Spannweite der Vermeidungskosten bei den einzelnen Mehr- oder Minderkosten in Kapitel 6 aufgezeigt werden kann, bei den Kostenangaben für Potentialabschätzungen wird jedoch wegen standortabhängiger oder anlagenspezifischer Fördersätze nur das EEG berücksichtigt.

Wartungs- und Instandhaltungskosten

Die Wartungs- und Instandhaltungskosten errechnen sich mit Angaben aus [3] nach den in der zurückgezogenen DIN 2067, Blatt 2 [4] festgelegten Vorschriften. Dabei wird davon ausgegangen, dass sich die Kosten gleichmäßig auf die Jahre verteilen, in dem sich die Mehrkosten gegen Ende der Lebenszeit durch die Minderkosten zu Beginn ausgleichen.

Energieträger- und Betriebsstoffkosten

Unter Energieträger- und Betriebsstoffkosten werden die Gesamtkosten für die eingesetzten Energieträger und die zum Betrieb der Anlage notwendigen Betriebsstoffe wie Schmiermittel oder Ähnliches verstanden.

Hilfsenergiekosten

Die zum Betrieb der Anlage notwendige Hilfsenergie, meist elektrischer Strom, wird kostenmäßig ebenfalls separat aufgeführt, um Aussagen über die dafür erforderlichen Aufwendungen treffen zu können. Die Hilfsenergie wird im Falle von elektrischem Strom vollständig aus dem öffentlichen Netz bezogen und muss daher auch mit dem normalen Strompreis bezahlt werden.

Erträge

Die Erträge einer Anlage oder ausgehandelter Konditionen setzen sich aus der Einspeisevergütung für elektrische Energie oder der Gutschrift für vermiedenen Strombezug zusammen.

Mit der Einspeisevergütung bekommt der Anwender einer regenerativen Erzeugungstechnik für jede eingespeiste Kilowattstunde Strom einen festen Betrag, der durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz festgelegt wird. Die Gutschrift für vermiedenen Strombezug aus dem öffentlichen Netz kann angerechnet werden, wenn der durch eine Maßnahme erzeugte Strom nicht vollständig ins öffentliche Netz eingespeist wird, sondern einen Teil des im Gebäude benötigten Stromes abdeckt. Der durch diese Maßnahme erzeugte Strom muss daher nicht aus dem öffentlichen Netz bezogen werden, so dass die hierfür eingesparten Stromkosten als Gutschrift für die Maßnahme angerechnet werden können.

2.7 Relative Einspareffekte und Vermeidungskosten

Systemvergleich über Differenzbetrachtung

Für die Gewinnung fundierter und belastbarer Ergebnisse ist eine Vorgehensweise notwendig, die transparent und nachvollziehbar ist. Das Instrumentarium zur Beurteilung von einzelnen Maßnahmen basiert auf dem Prinzip der Differenzbetrachtung (**Bild 2-2**), bei dem die zu untersuchende Maßnahme einem Referenzsystem gegenübergestellt wird (siehe auch [12]). Die Einzelberechnung der Maßnahmen erfolgt nach einem starren Schema, wobei eine separate Berechnung des Referenzsystems und der Einzelmaßnahme erfolgt.

Die Eingangsdaten der Berechnung bestehen aus den *allgemeinen Rahmendaten* und den *Kenngößen* für die Maßnahme bzw. für das Referenzsystem. In den allgemeinen Rahmendaten werden die baulichen, technischen oder nutzerbedingten Faktoren festgeschrieben, die für alle Maßnahmen gelten und den Bilanzraum charakterisieren. Zu ihnen gehören die Daten der Energieträger wie spezifische Emissionsfaktoren, Kosten oder Bereitstellungsnutzungsgrade, Zinssätze oder Tarife für Strom-einspeisung.

Als Kenngößen werden die Daten bezeichnet, die nicht für alle Maßnahmen, sondern für eine Einzelmaßnahme bzw. ein Referenzsystem gelten. Wichtigste Kenngößen sind die technischen und betriebstechnischen Daten wie technische Lebensdauer, Nutzungsgrad, Hilfsenergieverbrauch, eingesetzter Energieträger, Aufwand zur Wartung und Instandhaltung oder Ähnliches.

Im ersten Schritt werden mit einem auf die jeweilige Maßnahme bzw. auf das jeweilige Referenzsystem abgestimmten *Berechnungsverfahren* der kumulierte Energieaufwand berechnet, unterteilt nach den Phasen Herstellung, Nutzung und die Entsorgung. Hierbei wird jeweils in den kumulierten regenerativen und den kumulierten nichtregenerativen Anteil unterschieden, bei der Nutzungsphase erfolgt zusätzlich eine Unterscheidung in den innerhalb bzw. den außerhalb des Bilanzraumes stattfindenden Energieaufwand.

Im Anschluss werden analog zum KEA die kumulierten Emissionen für Kohlendioxid, Methan und Lachgas berechnet, bevor daraus das CO₂-Äquivalent über das jeweilige THP errechnet wird.

Die Berechnung der kumulierten Kosten bildet den letzten Schritt vor dem Vergleich der beiden Systeme. Bedingt durch zum Teil stark abweichende Lebensdauern der zu untersuchenden Systeme ist es erforderlich, nicht nur die Energieaufwendungen und Emissionen, sondern auch die Kosten gleichmäßig auf die gesamte Lebensdauer zu verteilen.

Die Aufteilung der herstellungs- und entsorgungsbedingten Emissionen auf die gesamte Lebensdauer ist mit einem systematischen Fehler verbunden, weil diese Emissionen vollständig im Jahr der Herstellung bzw. Entsorgung der Anlage erfolgen.

Der Systemquervergleich von Maßnahme und Referenzsystem erfolgt schließlich in einer *Differenzbetrachtung*, aus deren Ergebnisse die *Kennwerte* gebildet werden.

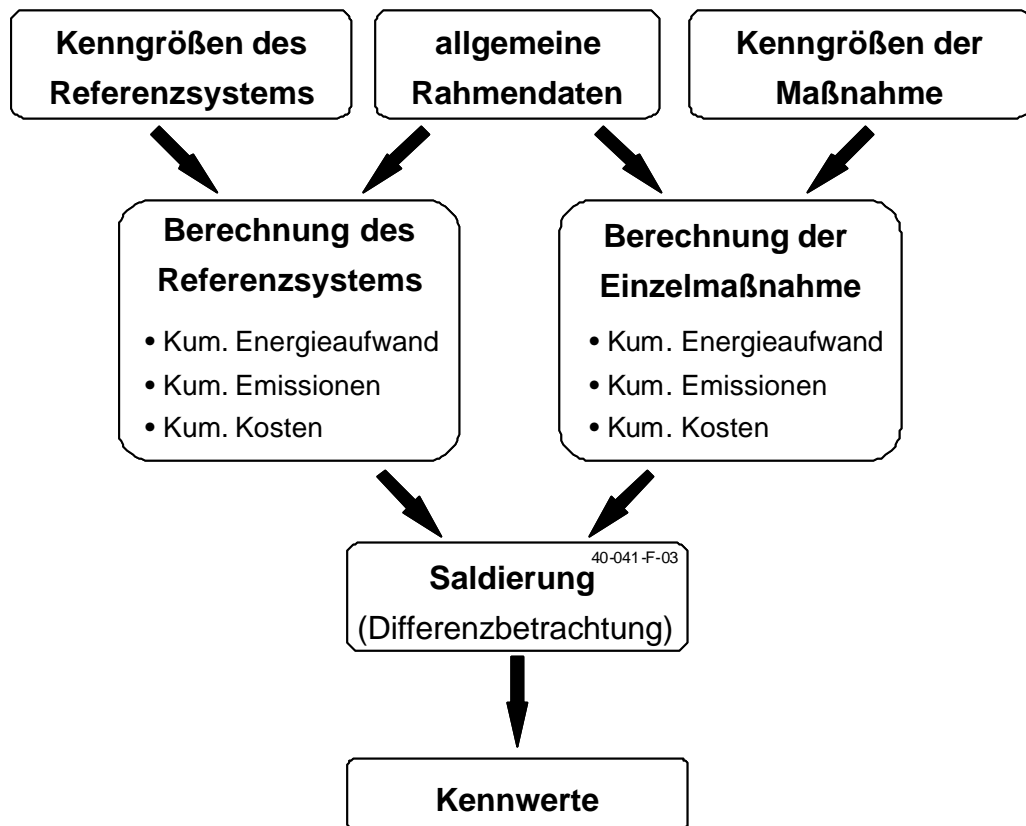


Bild 2-2: Differenzbetrachtung

Alle gewählten Beispiele werden als Einzelmaßnahmen ausgeführt. Die Einsparung von Energie oder die Vermeidung von CO₂ durch gleichzeitige Ausführung mehrerer Maßnahmen errechnet sich also nicht unbedingt als Summe aus den Einzelmaßnahmen.

Für die Berechnung von mehreren gleichzeitig stattfindenden Maßnahmen ist somit eine iterative Vorgehensweise mit den jeweils veränderten Randbedingungen notwendig, um aus den jeweiligen Ergebnissen die Veränderung gegenüber dem Ausgangszustand zu berechnen.

Spezifische Vermeidungskosten für Energie und Emissionen

Die spezifischen Vermeidungskosten k_v stellen den wichtigsten Kennwert für den Systemvergleich dar und geben definitionsgemäß an, wie viel die Vermeidung eines Kilogramms Kohlendioxid oder einer Kilowattstunde Primärenergie gegenüber dem entsprechenden Referenzsystem kostet. Sie werden über die Differenz der Kosten der Einzelsysteme und der entsprechenden Bezugsgröße (Primärenergie oder CO_{2(Aqu)}-Menge) berechnet, wobei folgender formelmäßiger Zusammenhang gilt:

Formel 2-7: Berechnung der spezifischen Vermeidungskosten

$$k_V = \frac{(k_{\text{fix}} + k_{\text{variabel}})_{\text{Neu}} - (k_{\text{fix}} + k_{\text{variabel}})_{\text{Ref}}}{(j_{\text{fix}} + j_{\text{variabel}})_{\text{Ref}} - (j_{\text{fix}} + j_{\text{variabel}})_{\text{Neu}}}$$

mit	k_{fix}	jährliche Kapitalkosten der Investition
	k_{variabel}	jährliche Energie-, Hilfsenergie- und Wartungskosten, Gutschriften und Erlöse
	j_{fix}	anteiliger jährlicher PE-Verbrauch bzw. $\text{CO}_{2(\text{Äqu})}$ -Ausstoß für Herstellung und Entsorgung
	j_{variabel}	nutzungsbedingter jährlicher PE-Verbrauch bzw. CO_2 -Ausstoß
	Neu	Maßnahme zur $\text{CO}_{2(\text{Äqu})}$ -Einsparung
	Ref	Referenzsystem

Die Einheit der spezifischen Vermeidungskosten sind entweder € pro $\text{kg}_{\text{CO}_{2(\text{Äqu})}}$ oder € pro kWh_{PE} . Bei diesem Ansatz wird davon ausgegangen, dass eine Maßnahme zur CO_2 - bzw. $\text{CO}_{2\text{Äqu}}$ -Minderung teurer ist als das Referenzsystem, jedoch eine Einsparung an Emissionen und Primärenergie erzielt wird. Es entstehen somit positive Vermeidungskosten.

Negative Vermeidungskosten k_V entstehen nur im Falle eines negativen Zählers, was geringere Kosten der Minderungsmaßnahme gegenüber dem Referenzsystem und damit eine Kostenersparnis für den Anwender bedeutet. Ein negativer Nenner entsteht nur durch einen Mehrausstoß an CO_2 bzw. einen Mehrverbrauch an Energie und wird jedoch ausgeschlossen, da die neue Maßnahme eine Verminderung und keinesfalls einen Mehrausstoß bzw. einen Mehrverbrauch bewirken soll.

So mathematisch trivial sich die Formel für die spezifischen Vermeidungskosten darstellt, so komplex ist die Ermittlung der in diese Formel einzusetzenden Größen. Für die objektive Vergleichbarkeit unterschiedlicher Maßnahmen muss der im Kapitel 2.2 aufgeführte Untersuchungsrahmen mit Referenzsystem, Untersuchungsgegenstand, Bezugsgrößen und Systemgrenzen exakt festgelegt werden. Besonderes Augenmerk liegt hierbei auf den Systemgrenzen, da gerade bei der lebenszyklischen Betrachtung der kumulierten Energieaufwendungen und Emissionen die Anlagenherstellung und Entsorgung wichtige Aspekte darstellen.

Einsparungsquote für Energie und Emissionen

Zur Quantifizierung der Nachhaltigkeit einer Maßnahme kann die Einsparungsquote für Energie, CO_2 und $\text{CO}_{2\text{Äqu}}$ herangezogen werden. Beide Einsparungsquoten geben die Veränderung beim Energieverbrauch oder bei dem CO_2 -/ $\text{CO}_{2\text{Äqu}}$ -Ausstoß an, welche durch diese Maßnahme während der ganzen Lebensdauer bewirkt wird. Zahlenwerte kleiner als Null bedeuten einen Mehrverbrauch der Maßnahme gegenüber dem Referenzfall. Die Energieeinsparungsquote ist wie folgt definiert:

Formel 2-8: Berechnung der Energieeinsparungsquote

$$\text{Energie-Einsparungsquote} = \frac{\text{KEA}_{\text{Ref}} - \text{KEA}_{\text{Neu}}}{\text{KEA}_{\text{Ref}}} \quad [\%]$$

Analog hierzu wird auch die CO_2 -/ $\text{CO}_{2\text{Äqu}}$ -Einsparungsquote berechnet.

Amortisationszeit

Die Amortisationszeit ist definiert als der Zeitpunkt, an dem die zu vergleichenden Systeme einen Gleichstand an Kosten, Energiebedarf oder Emissionen erreichen. Die Herstellung und die Entsorgung eines Systems verursacht einen Fixanteil an Energie, Emissionen oder Kosten, die Nutzung eines Systems verursacht einen von der Nutzungsdauer abhängigen variablen Anteil.

Generell unterscheidet man die Amortisationszeit in die Fälle vorzeitiger Austausch eines Systems und den Fall einer Entscheidung für oder gegen ein System. Beide Fälle werden im Folgenden kurz skizziert.

Vorzeitiger Austausch eines Systems

Bei diesem Ansatz wird davon ausgegangen, dass ein bestehendes, noch funktionsfähiges System ganz oder teilweise durch ein moderneres System ersetzt werden soll. Zusätzlich zu den aus dem bestehenden System bereits vorhandenen kumulierten Anteilen kA an Energie, Emissionen oder Kosten kommen noch die Anteile des moderneren Systems hinzu, da das bestehende System vor Erreichen seiner Lebensdauer und damit vor vollständiger Abschreibung der Aufwendungen, Emissionen oder Kosten für Herstellung und Entsorgung ergänzt oder ersetzt wird. Grundsätzlich soll aber noch während der erwarteten technischen Lebensdauer des bestehenden Systems eine Einsparung erreicht werden. Die Einspareffekte gegenüber dem ursprünglichen System beginnen zum Amortisationszeitpunkt und hängen vom Zeitpunkt des vorzeitigen Austauschs und der Anteile der beiden Systeme ab.

Zur Erklärung dient folgendes **Bild 2-3**, in dem links eine detaillierte und rechts eine vereinfachte Darstellung abgebildet ist.

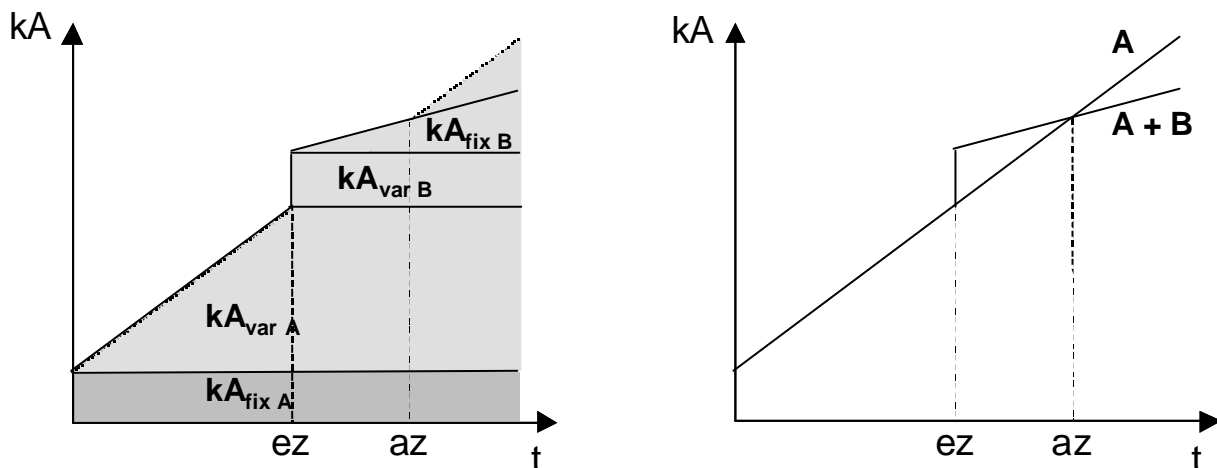


Bild 2-3: Vorzeitiger Austausch eines Systems

Dargestellt sind die kumulierten Anteile der Systeme für Energie, Emissionen oder Kosten. Die Fixanteile sind den Herstellungskosten zuzuordnen, die variablen Anteile der Nutzungsphase. Der Fixanteil des Systems A ist konstant über die Zeit und erscheint somit als Rechteck. Die variablen Anteile von A steigen linear mit der Lebensdauer.

Zum Zeitpunkt ez entscheidet sich der Nutzer für einen vorzeitigen Ersatz des bestehenden Systems. Bei diesem Zeitpunkt kommt der Fixanteil des moderneren Systems B hinzu und die variablen Anteile

des älteren Systems A steigen nicht mehr an; dafür steigen die variablen Anteile des Systems B mit geringerer Steigung. Aufgrund der zusätzlichen Anteile liegt die Kurve über der des unverändert weiter betriebenen Systems A.

Zum Zeitpunkt **az** schneidet die Summenkurve der Anteile des modernisierten Systems die des unverändert weiter betriebenen Systems A und liegt dann unterhalb von dieser, so dass ab diesem Zeitpunkt eine Einsparung gegenüber dem Ursprungszustand vorliegt.

Rechnerisch ergibt sich der Zeitpunkt der Amortisation aus folgender Formel gilt dann, wenn $kA_{\text{fix A}}$ von der Maßnahme unbeeinflusst ist (keine Abrisskosten, keine Erlöse durch Verkauf o.ä.):

Formel 2-9: Amortisationszeit für vorzeitigen Austausch

$$az = ez + \frac{kA_{\text{fix B}}}{kA_{\text{var A}} - kA_{\text{var B}}} \quad [a]$$

- Mit
- az = Amortisationszeit [a]
 - ez = Ersatzzeit [a]
 - kA_{fix} = Fixanteil eines Systems [kWh], [t] oder [€]
 - kA_{var} = variabler Anteil eines Systems [kWh/a], [t/a] oder [€/a]
 - A = System, das vorzeitig ausgetauscht wird
 - B = System, das vorzeitig eingebaut wird

Amortisationszeit für Systemvergleich

Bei der Entscheidung für oder wider ein System ist es aus Nachhaltigkeitsgründen notwendig, die Entscheidung nicht nur von anfänglich niedrigeren Werten abhängig zu machen, sondern in der Entscheidung die gesamte Lebensdauer t_L zu berücksichtigen.

Rechnerisch ergibt sich der Amortisationszeit az nach folgender Formel:

Formel 2-10: Amortisationszeit für Systemvergleich

$$az = \frac{kA_{\text{fix B}} - kA_{\text{fix A}}}{kA_{\text{var A}} - kA_{\text{var B}}} \quad [a]$$

- Mit
- az = Amortisationszeit [a]
 - kA_{fix} = Fixanteil eines Systems [kWh], [t] oder [€]
 - kA_{var} = variabler Anteil eines Systems [kWh/a], [t/a] oder [€/a]
 - A = Referenzsystem
 - B = Neues System

Beim paarweisen Vergleich von Systemen können folgende vier Fälle unterschieden werden, die zur Vereinfachung graphisch dargestellt werden (**Bild 2-4**).

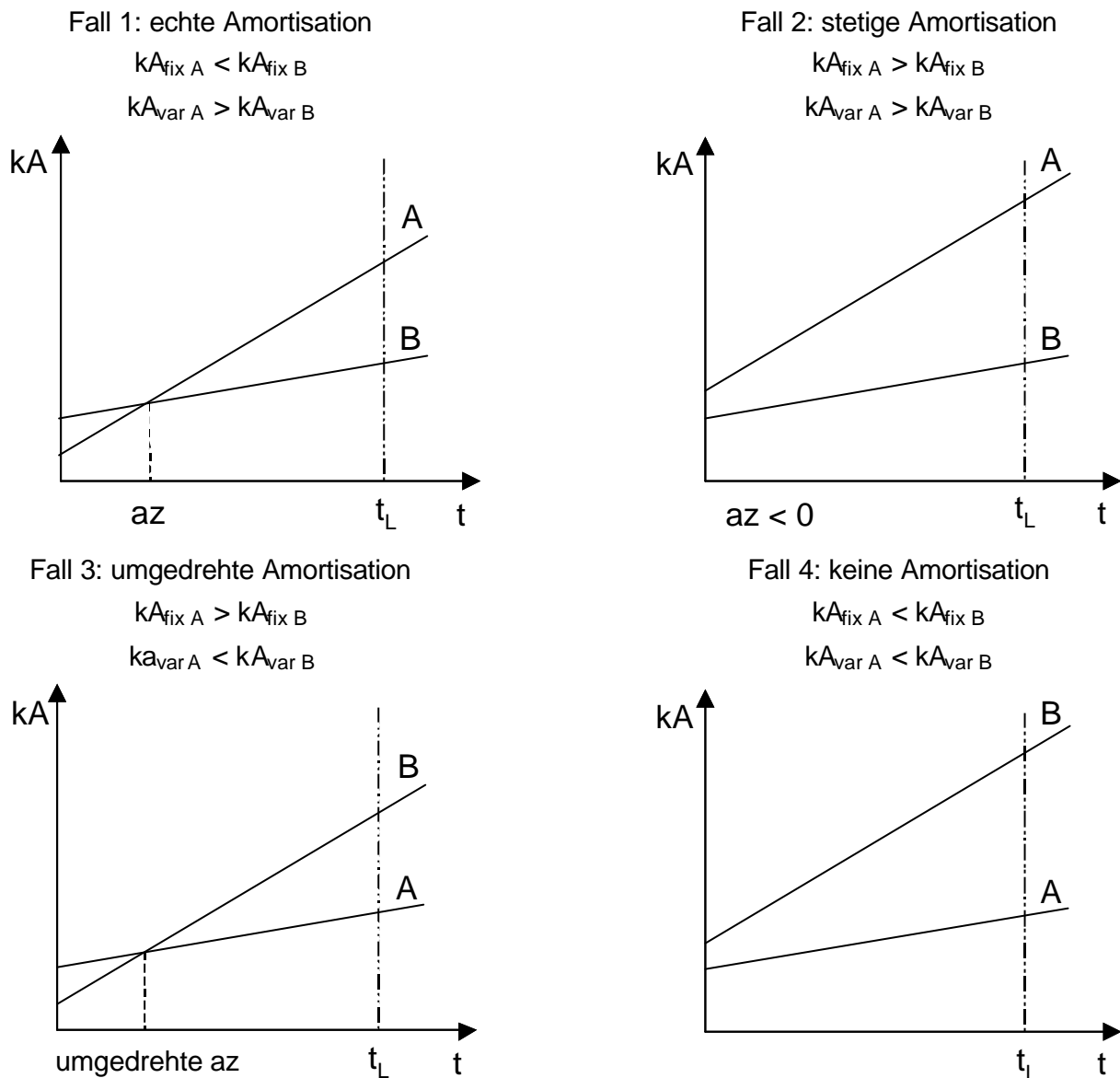


Bild 2-4: Amortisationszeit für Systemvergleich – mögliche Fälle

2.8 Verfahren zur Auswahl von Maßnahmen

Allgemeines zu Bewertungen

Die Entscheidung für oder gegen eine Maßnahme erfolgt vom Einzelnen meist intuitiv. Je mehr Faktoren berücksichtigt werden müssen, desto komplexer wird solch eine Entscheidung und desto größer wird die Irrtumswahrscheinlichkeit.

Mit Hilfe von Bewertungsmethoden soll die Rationalität politischer und fachlicher Entscheidungen erhöht und die Komplexität reduziert, transparenter und vor allem nachvollziehbar gemacht werden. Grundsätzlich werden zwei Arten von Bewertungen unterschieden. Die Bewertung von Einzelwirkungen erfolgt durch den Soll-Ist-Vergleich (absolute Bewertung), der die Eignung oder Nicht-Eignung bestimmt. Bei der zweiten Art erfolgt die Bewertung über eine Abwägung (komparative Bewertung) zwischen unterschiedlichen Zielen, die über Abwägungskriterien zusammengeführt werden.

Um zu einer eindeutigen Bewertung zu gelangen, sind viele Einzelkriterien zu einer einzigen Aussage oder zumindest möglichst wenigen Aussagen zu verdichten. Hierbei nimmt man aber den Verlust von Informationen in Kauf, da die Bedeutung der Einzelkriterien an der Gesamtaussage sinkt. Aus diesem Grund werden Aggregationsregeln verwendet, die angeben, wie diese Einzelkriterien zueinander gewichtet und anschließend verknüpft werden sollen. Mit den Bewertungskriterien erfolgt die Bewertung durch Einstufung der Alternativen in Bewertungsskalen, die entweder qualitativer oder quantitativer Art sein können.

Es gibt eine große Menge von Bewertungsmethoden, von denen aber nur einige beispielhaft aufgezeigt werden. Monetäre Methoden, wie die Kosten-Nutzen-Analyse (KNA) und die Kosten-Wirksamkeits-Analyse (KOWA) sind für öffentliche Maßnahmen von erheblicher finanzieller Bedeutung als Kosten-Nutzen-Untersuchungen durchzuführen. Multidimensionale Methoden wie die Nutzwertanalyse (NWA) haben nicht nur eine monetäre Bewertung, sondern berücksichtigen verschiedenste Kriterien wie Zeiteinheiten oder Mengen als komparative Bewertung, um eine Reihenfolge der Eignung von Alternativen zu erstellen. Die grundsätzliche Eignung einer Maßnahme wird vorausgesetzt.

Verwendete Bewertungsmethode

Für diese Untersuchung wurde eine Bewertungsform entwickelt, die es gestattet, zur Hochrechnung des Potentials für Bayern eine Auswahl der unter verschiedenen Gesichtspunkten jeweils optimalen Maßnahme aus einem Maßnahmenbündel zu treffen. Der optimale Fall ist hierbei von Vorgaben abhängig, über die der Einfluss dieses Einzelergebnisses auf das Gesamtergebnis bestimmt wird. Es werden nur Maßnahmen berücksichtigt, welche gleichzeitig eine Minderung sowohl bei der Primärenergie, als auch bei den CO₂- bzw. CO_{2Äqu}-Emissionen erzielen.

Das Schema dieser Bewertung läuft wie folgt ab: Jedes Einzelergebnis einer Maßnahme wird mit dem entsprechenden Maximum oder Minimum innerhalb dieser Alternativen verglichen und bei Erfüllung des Gleichheitskriteriums mit dem Gewichtungsfaktor in einer Bewertungstabelle abgelegt. Die Maßnahme mit der größten Summe der Gewichtungsfaktoren in der Bewertungstabelle stellt die unter den gewählten Gewichtungsfaktoren optimale Variante dar.

Mit den Gewichtungsfaktoren können die Ziele der Optimierung festgelegt werden, so zum Beispiel minimale Kosten bei maximaler CO₂-Einsparung oder maximale CO₂-Einsparung bei maximaler PE-Reduktion, oder aber eine Mischform mit frei wählbaren Gewichtungen der einzelnen Kennwerte.

3 Ausgangsbedingungen im Jahr 2000

Um sinnvolle Schwerpunkte für Maßnahmen zur Energieeinsparung und Emissionsminderung zu identifizieren und deren Potential abschätzen zu können, ist die Kenntnis der Entwicklung und der Struktur des Energieverbrauchs sowie der zugehörigen Emissionsmengen erforderlich.

3.1 Energiebilanz Bayern

Für die Erstellung der Energiebilanz werden Zahlenwerte aus [2] herangezogen und in Form eines Energieflussbildes (**Bild 3-1**) dargestellt.

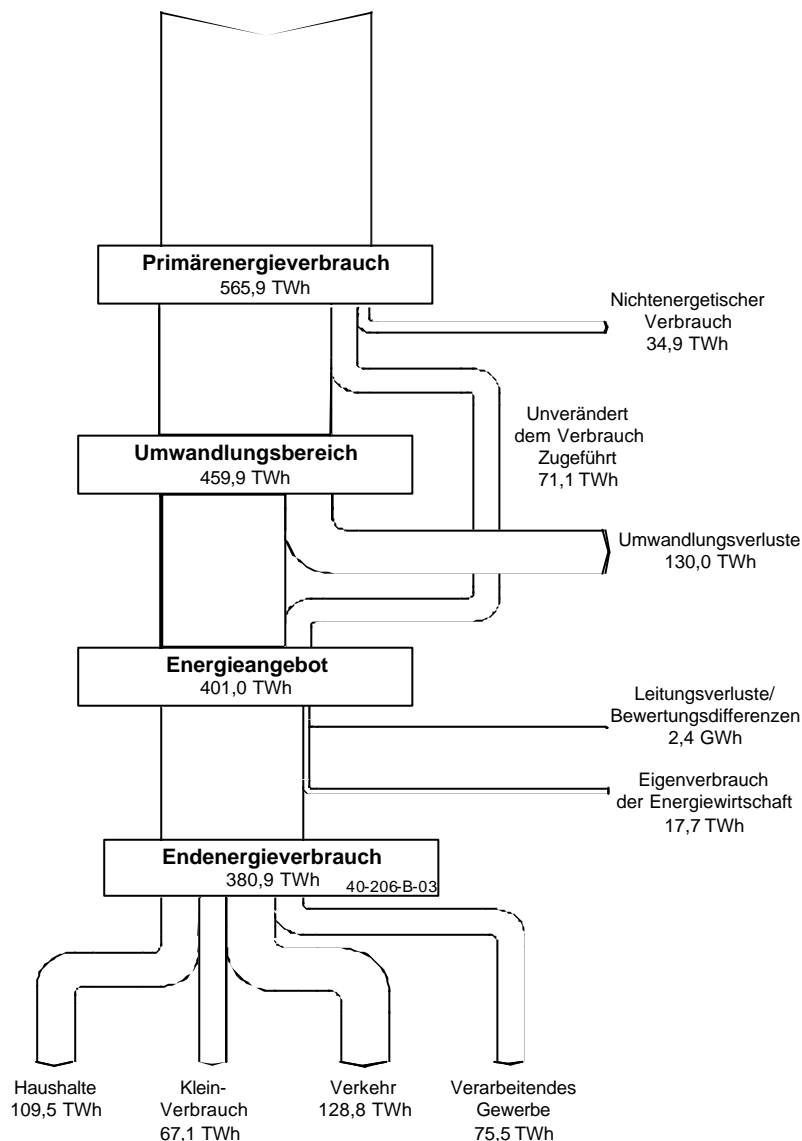


Bild 3-1: Energieflussbild Bayern 2000

Den ersten Posten der Energiebilanz bildet der Primärenergieverbrauch, der die Gewinnung, den Handel und die Bestandsveränderungen von Energieträgern umfasst, die in der Natur vorkommen und technisch noch nicht umgewandelt wurden. 81,3 % der Primärenergie oder 459,9 TWh werden direkt im Umwandlungsbereich eingesetzt, 71,1 TWh oder 12,6 % werden unverändert dem Verbrauch zugeführt. Ein Anteil von 6,2 % (34,9 TWh) werden nichtenergetisch als Rohstoff in Produkten verbraucht.

Im Umwandlungsbereich wird die Primärenergie in Kraftwerken und Raffinerien zu elektrischer Energie, Fernwärme und Mineralölprodukten (Kraftstoffe) umgewandelt. Diese Umwandlung ist mit Verlusten in Höhe von 130 TWh bzw. 28,3 % der eingesetzten Energie verbunden.

Der Umwandlungsausstoß und die direkt dem Verbrauch zugeführte Primärenergie bilden zusammen das Energieangebot, von dem die Leitungsverluste/ Bewertungsdifferenzen und der Eigenverbrauch der Energiewirtschaft abgezogen werden müssen, um zum Endenergieverbrauch zu gelangen.

Der Endenergieverbrauch teilt sich auf die Sektoren Haushalte, Kleinverbrauch, Verkehr und produzierendes Gewerbe auf, wobei der Verkehr einen Anteil von 33,8 % (128,8 TWh), der Haushaltssektor einen von 28,7 % (109,5 TWh) und der Kleinverbrauch einen Anteil von 17,6 % (67,1 TWh) ausmacht. Die restlichen 75,5 TWh (19,8 %) werden vom verarbeitenden Gewerbe benötigt.

Die Haushalte und der Kleinverbrauch besitzen am gesamten Endenergieverbrauch (**Bild 3-2**) einen Anteil von 46,4 %, der sich seit 1970 in der Relation gegenüber den beiden anderen Bereichen kaum verändert hat, da die Einsparungen beim verarbeitenden Gewerbe durch einen Anstieg im Verkehrsbereich nahezu ausgeglichen wurden.

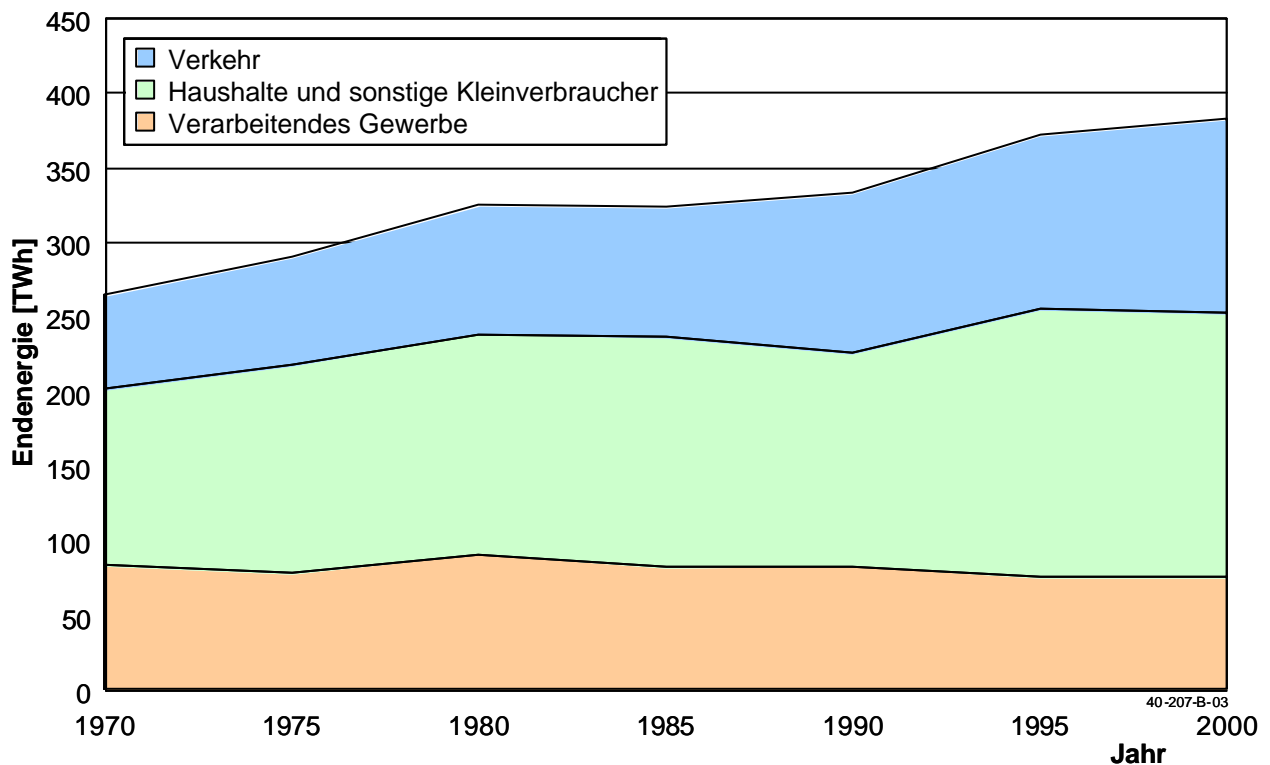


Bild 3-2: Entwicklung des Endenergieverbrauchs in Bayern von 1970 bis 2000

Absolut ist der Energieverbrauch bei den Haushalten und sonstigen Kleinverbrauchern von 118 TWh im Jahr 1970 um mehr als 30 % auf 177 TWh im Jahr 2000 angestiegen. Zwischen den Jahren 1995 und 2000 ist bei den Haushalten und Kleinverbrauchern ein leichter Rückgang des Energieverbrauches zu verzeichnen, der sich nach [43] aufgrund von energie- und umweltpolitischen Maßnahmen und einer Sensibilisierung für Umweltbelange fortsetzen wird.

3.2 CO₂-Emissionsbilanz Bayern

Mit dem Endenergiebedarf verbunden sind Emissionen, welche analog zur Energie auf die Sektoren aufgeteilt werden können. Im Jahr 2000 war der Energiebedarf in Bayern mit CO₂-Emissionen in Höhe von insgesamt 87,7 Mio. Tonnen verbunden, pro Einwohner und Jahr bedeutet dies eine CO₂-Menge in Höhe von 7,13 t.

Klammert man die durch den Umwandlungsbereich verursachten vorgelagerten Emissionen für diese Darstellung aus, so ergibt sich nach [2] die in **Bild 3-3** dargestellte Aufteilung auf die Sektoren. Der Verkehrssektor besitzt mit 45,8 % den größten Anteil der durch den Endenergieverbrauch verursachten Emissionen, gefolgt von den Haushalten und sonstigen Kleinverbrauchern mit 39,8 %. Die übrigen 14,5 % der energiebedingten Emissionen werden durch das verarbeitende Gewerbe verursacht.

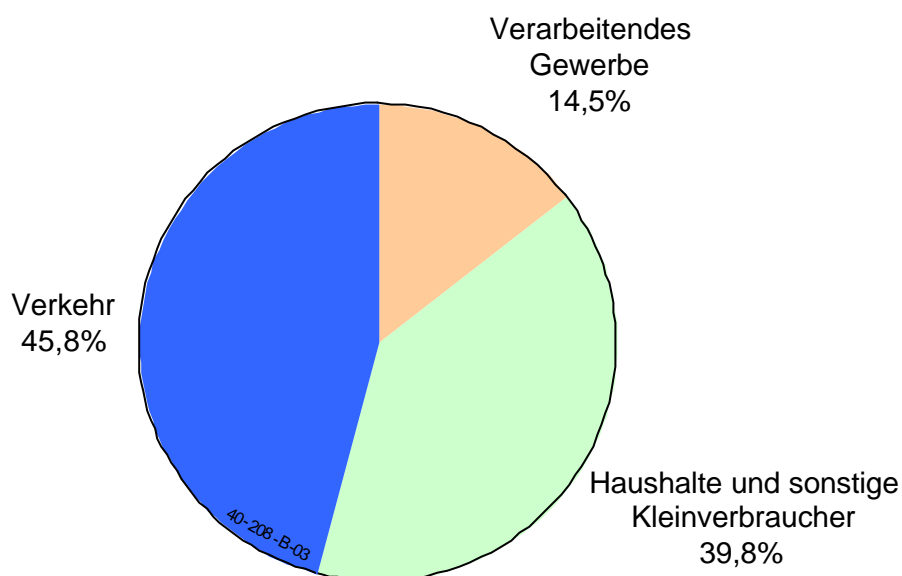


Bild 3-3: Aufteilung der direkten Emissionen auf die Sektoren

Die zukünftige Entwicklung der Emissionen hängt nicht nur von der Entwicklung des Energieverbrauches ab, sondern ganz wesentlich von der Zusammensetzung des eingesetzten Energiemixes. So wird der geplante Ausstieg aus der Kernenergie zwangsläufig eine Erhöhung der spezifischen Emissionen der Stromerzeugung nach sich ziehen.

4 Maßnahmen im Haushaltsbereich und Berechnungsalgorithmen

Es gibt zahlreiche Möglichkeiten, Energie- und Emissionsmengen einzusparen. Die Höhe dieser Einsparungen ist dabei von sehr vielen Faktoren abhängig, wie zum Beispiel von:

- der Größe und der Struktur des Haushaltes (Personenzahl, Altersstruktur, Gewohnheiten)
- der Geräteausstattung des Haushaltes
- typischen Nutzergewohnheiten
- der Gebäudeart (Alter, Lage, Typ, wärme- und anlagentechnische Ausstattung, Kompaktheit, Flächen im und am Gebäude, usw.).
- der Lage des Gebäudes (enges Bergtal in Oberbayern oder Maintal bei Würzburg)
- der Ausrichtung des Gebäudes

Anhand ausgewählter Maßnahmen aus dem Bereich der Haushalte soll ein Großteil möglicher Maßnahmen abgedeckt werden, wobei bei der Auswahl der Maßnahmen auf Praxisrelevanz und Durchführbarkeit geachtet wurde.

Im Folgenden werden die untersuchten Maßnahmen detailliert erläutert, um die einzelnen Variationen zu verstehen und die Maßnahme als Gesamtes nachvollziehbar zu machen, bevor die Vorgehensweise bei der Einzelberechnung aufgezeigt wird.

4.1 Wärmedämmung von Gebäuden

Diese Maßnahmengruppe umfasst Beispiele zur Verminderung von Wärmeverlusten an Gebäuden. Es wird aufgezeigt, welche Wärmeverluste mit der Durchführung unterschiedlicher Maßnahmen vermindert werden können und wie viel Primärenergie und Emissionen zu welchen Kosten eingespart werden können.

Die aktuelle gültige Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden [13], auch als EnEV bezeichnet, ist mit Wirkung vom 01.02.2002 in Kraft getreten und führt die Wärmeschutzverordnung und die Heizungsanlagenverordnung in einem Einzelwerk zusammen. Sie bezieht sich nicht auf den Endenergieverbrauch, sondern setzt Grenzwerte auf Primärenergieebene.

Anforderungen der EnEV an Neubauten:

- Senkung des Energiebedarfs neu zu errichtender Gebäude auf einen Niedrigenergiehausstandard, durchschnittlich 30 % gegenüber dem Niveau der Wärmeschutzverordnung 1995,
- Übergang zu einer ganzheitlichen Betrachtung von Neubauten unter Einbeziehung der Anlagentechnik,
- Weiterentwicklung des vereinfachten Nachweisverfahrens für bestimmte Wohngebäude,
- Erleichterung des Einsatzes erneuerbarer Energien zur Heizung, Lüftung und Warmwasserbereitung, insbesondere bei Neubauten und
- Erhöhung der Transparenz für Bauherren und Nutzer durch aussagefähige Energieausweise.

Anforderungen der EnEV an den Gebäudebestand:

- Verschärfung der energetischen Anforderungen bei wesentlichen Änderungen an Bauteilen, die erneuert, ersetzt oder erstmalig eingebaut werden,
- Verpflichtung zur Außerbetriebnahme besonders alter Heizkessel, die deutlich unter den heutigen Effizienzstandards liegen, bis zum Ende des Jahres 2005 bzw. 2008,
- Dämmung von obersten Geschossdecken und von ungedämmten Rohrleitungen für Wärmeverteilung und Warmwasser bis Ende 2005 und
- Rahmen für freiwillige Angabe von Energieverbrauchskennwerten

Die meisten Gebäude werden jedoch normalerweise nicht umfassend saniert, sondern durch kleinflächige Ausbesserung technisch ertüchtigt und durch neuen Anstrich wieder optisch aufgebessert. Es ist dem Hausbesitzer bei Arbeiten, die weniger als 20 % der jeweiligen Fassadenfläche betreffen, nicht vorgeschrieben, den U-Wert seiner Gebäudeteile zu verbessern oder die Lüftungsverluste zu vermindern, er kann jedoch die Gelegenheit nützen, sein Gebäude wärmetechnisch zu ertüchtigen. Die Wärmedämmung kann zum Beispiel von dem zur Renovierung des Gebäudes aufgestellten Gerüst aus angebracht und somit erhebliche Kosten für einen Gerüstaufbau zum alleinigen Zwecke der Wärmedämmung eingespart werden.

Die bei alleiniger Verbesserung des Wärmeschutzes erforderlichen Kosten werden als Gesamtkosten, diejenigen Kosten, die bei gleichzeitig erfolgender Renovierung für die Anbringung der Wärmedämmung anfallen, werden als Mehrkosten gegenüber der „sowieso“ erfolgenden Renovierung bezeichnet. Einige Maßnahmen, wie die Isolierung der Kellerdecke oder des Dachbodens, können auch ohne anstehende Renovierung durchgeführt werden.

Die bei den Potentialabschätzungen angegebenen monetären Aufwendungen werden in dieser Untersuchung aus den Gesamtkosten errechnet, da diese den maximalen Kostenaufwand und damit den sogenannten Worst-case darstellen. Geringere Kosten können zum Beispiel durch die Kombination verschiedener wärmetechnischer Maßnahmen oder durch Eigenleistungen erreicht werden.

Die durch Dämmung eingesparte Heizwärme wird über den Unterschied der U-Werte der einzelnen Bauteile in guter Näherung berechnet, so dass die Höhe des gesamten Heizwärmebedarfs für das betrachtete Gebäude in diesen Fällen unerheblich ist [12] :

Die Berechnung der Heizenergieeinsparung pro m² Bauteilfläche ergibt sich zu:

Formel 4-1: Heizenergieeinsparung

$$\Delta Q = (u_{\text{Alt}} - u_{\text{Neu}}) * 0,024 * GT * f_{\text{NA}} \left[\frac{\text{kWh}}{\text{m}_B^2 * \text{a}} \right]$$

mit	u_{Alt}	U-Wert für das Gebäudeteil vor der Verbesserung
	u_{Neu}	U-Wert für das Gebäudeteil nach der Verbesserung
	GT	= 2900 Kd (Mittlere Gradtagzahl für Deutschland (Referenzklima) nach der DIN V 4108-6: 2000-11, Tab. A.2)
	f_{NA}	= 0,95 (Faktor für Nachtabenkung der Heizung)

Der verbesserte U-Wert je Bauteil berechnet sich mit folgender Formel aus dem U-Wert vor der wärmeschutztechnischen Verbesserung [12]:

Formel 4-2: Berechnung des neuen U-Wertes

$$U_{\text{Neu}} = \left(\frac{1}{U_{\text{Alt}}} + \frac{s_{\text{WD}}}{\lambda_{\text{WD}}} \right)^{-1} \left[\frac{W}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right]$$

mit: U_{Alt} U-Wert für das Gebäudeteil vor der Verbesserung
 U_{Neu} U-Wert für das Gebäudeteil nach der Verbesserung
 s_{WD} Schichtdicke der Wärmedämmung (Verbesserungsmaßnahme)
 λ_{WD} Wärmeleitwert der Wärmedämmung (Verbesserungsmaßnahme)

Die Angaben zum Kumulierten Energieaufwand für die Herstellung und die Entsorgung der einzelnen Dämmmaterialien sowie den zugehörigen CO₂-Emissionen stammen aus [9] und [14]. Für eine Variation der Dämmschichtdicken wurden die jeweiligen Zahlenwerte in einen Fixanteil und in einen, von der Dämmschichtdicke abhängigen, variablen Anteil aufgeteilt.

Die Umrechnung von der Heiz- zur Endenergie erfolgt über den Jahresnutzungsgrad der im jeweiligen Typgebäude vorhandenen Heizungsanlage. Diese Heizungsanlage ist nach der Durchführung der Wärmeschutzmaßnahmen überdimensioniert, da mit der Wärmedämmung die Heizleistung sinkt. Mit der Überdimensionierung steigen die Bereitschaftsverluste, die sich in einem schlechteren Jahresnutzungsgrad des Wärmeerzeugers niederschlagen. Dieser Effekt wird bei der Berechnung vernachlässigt, da er sich durch eine kürzere Heizperiode aufgrund der längeren Auskühlkurve des Gebäudes in etwa kompensiert.

Als Quelle für die Kostenangaben der einzelnen Maßnahmen wird [3] verwendet; einzige Ausnahme bildet die Zwischensparrendämmung, deren Kosten aus [15] entnommen werden.

Förderprogramme werden entsprechend den jeweiligen Anforderungen in die Investitionskosten eingerechnet und zusätzlich als „berücksichtigte Fördermittel“ zum leichteren Nachvollzug der Berechnung angegeben.

Als Dämmstoff werden übliche Materialien wie PS (Polystyrol), EPS (expandiertes Polystyrol) oder PUR (Polyurethan) verwendet, auf eine zusätzliche Variation der Materialien innerhalb einer Maßnahme wird verzichtet. Die Dicke der Dämmschicht errechnet sich jeweils aus dem U-Wert des vorhandenen Bauteils und des einzuhaltenden U-Wertes nach der EnEV.

4.1.1 Dämmung von Dach und Decke

Bei der Dämmung von Dach und Decke erfolgt die Auswahl der in Frage kommenden Maßnahmen über das jeweilige Modellgebäude. Grundsätzlich stehen die Dämmung des nicht ausgebauten Dachbodens, die Aufsparrendämmung und die Dämmung zwischen den Sparren für Gebäude mit Steildach zur Auswahl. Die Dämmschichtdicke wird so gewählt, dass die kleinste Dicke die Anforderungen der EnEV von maximal 0,30 W/(m² K) erfüllt. Die zweite Dämmschichtdicke wird 1,5-mal so dick und die dritte Dicke zweimal so dick wie die Mindestdicke angesetzt.

Als vierte Möglichkeit kann für ein Gebäude mit Flachdach durch ein Umkehrdach wärmetechnisch verbessert werden, bei dem die Mindestanforderung durch die EnEV mit $0,25 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ festgelegt wird.

Die Dämmung der obersten Geschossdecke erfolgt durch PS-Dämmplatten, die auch nach Abschluss der Arbeiten begehbar bleiben. Diese Maßnahme kann in den meisten Gebäuden relativ leicht durchgeführt werden und wird durch die EnEV für nicht begehbare, aber zugängliche Geschossdecken beheizter Räume in MFH zwingend vorgeschrieben.

Als zweite Maßnahme wird die Aufsparrendämmung eines Steildaches mittels PUR betrachtet, das außerdem eine neue Betonsteindeckung erhält. Das Dach muss hierbei komplett abgedeckt, gedämmt, mit einer neuen Lattung versehen und schließlich neu eingedeckt werden.

Die Zwischensparrendämmung, also die vom Dachboden aus erfolgende Dämmung des Daches zwischen den einzelnen Sparren, kann bei einem beabsichtigten Ausbau des Dachbodens erfolgen, der Sparrenanteil des Daches wird mit 9 % angesetzt.

Die vierte Maßnahme zeigt eine Möglichkeit für ein Flachdach auf. Hierzu wird aus dem Flachdach ein sogenanntes Umkehrdach erzeugt, indem die Dämmplatten aus PS auf die vorhandene Dachhaut aufgelegt und anschließend mittels Dachpappe oder Ähnlichem abgedeckt werden. Anschließend kann entweder eine Bekiesung oder ein Ausbau zu einer Dachterrasse erfolgen.

4.1.2 Dämmung von Wänden

Eine Einsparung von Heizenergie durch Dämmung der Außenwand wird anhand von drei unterschiedlichen Maßnahmen für die untersuchten Gebäudetypen demonstriert. Nach der EnEV muss bei der Erneuerung von mehr als 20 % einer Außenwand ein maximaler Wärmedurchgangskoeffizient von $0,35 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ eingehalten werden. Die Dämmschichtdicke wird auch hier so gewählt, dass die kleinste Dicke die Anforderungen der EnEV erfüllt. Die zweite Dämmschichtdicke wird 1,5-mal so dick und die dritte doppelt so dick wie die Mindestdicke angesetzt.

Die am häufigsten durchgeführte und hier als erstes aufgeführte Maßnahme ist die Anbringung eines Wärmedämmverbundsystems aus PS-Dämmplatten. Eine weitere, hier auch aufgeführte Maßnahme bildet die hinterlüftete Außenwandbekleidung. Bei beiden Maßnahmen wird nach Anbringung der Dämmschicht ein neuer Außenputz aufgebracht.

Eine nicht unproblematische, bei einigen Gebäuden aber einzig mögliche Variante besteht in der Innendämmung einer Außenwand, bei der auf die innen angebrachte Wärmedämmschicht anschließend noch eine Dampfsperre und eine Gipskartonverkleidung aufgebracht werden muss. Schwierigkeiten treten bei dieser Maßnahme mit der Dampfsperre auf, da sie auch bei Öffnungen, Schlitzfenstern oder Aushöhlungen in der Mauer wie Fenster oder Steckdosen absolut dicht sein muss. Schäden in der Dampfsperre können zu Stock- oder Schimmelflecken und nur bedingt reparablen Schäden am Mauerwerk führen.

4.1.3 Dämmung im Kellerbereich

Die Art und der Umfang der Wärmedämmung im Kellerbereich kann aufgrund der unterschiedlichen Nutzung der Kellerräume nur generell aufgezeigt werden. Die Maßnahmen zeigen beispielhaft die Dämmung der Kellerdecke sowie die Innenwand- und die Fußbodendämmung auf. Bei der Dämmung der Kellerdecke muss nach der EnEV ein U-Wert von mindestens $0,40 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ eingehalten werden

und erfolgt durch Anbringung von PS-Platten auf der Unterseite der Kellerdecke, sofern dies durch Leitungsverläufe möglich ist. Die Kellerwanddämmung, bei der nach der EnEV ein U-Wert von $0,50 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ genügt, erfolgt auf der Innenseite durch Aufbringen einer Dämmschicht aus PS-Platten, einer Dampfsperre und einer Gipskartonschicht.

Bei der Kellerfußbodendämmung muss ein U-Wert von $0,50 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ eingehalten werden. Die Dämmschicht wird hierbei auf eine Diffusionssperre gelegt, bevor eine Estrichschicht darüber eingebracht wird.

4.1.4 Einbau von neuen Fenstern

Die Einsparung von Heizenergie durch den Austausch der Fenster erweist sich als teure Wärmedämm-Maßnahme aufgrund der Tatsache, dass alle Kosten der Maßnahme zugeschlagen werden müssen, da hier „ohnehin anfallende“ Investitionen wie bei der Sanierung einer Fassade weitgehend entfallen.

Bei den Beispielen wird zwischen einem Austausch mit Blendrahmenaufdoppelung und einem Austausch inklusive Blendrahmen unterschieden. Bei der Blendrahmenaufdoppelung verbleibt der eigentliche Fensterstock im Mauerwerk; ein neuer Fensterstock wird an dem alten befestigt. Im Falle des Austausches inklusive Blendrahmen wird der alte Fensterstock komplett entfernt und ein neuer eingebaut.

Die Unterscheidung von Wärmeschutz- und Isolierverglasung erfolgt nur noch hinsichtlich der erreichbaren Heizwärmeeinsparung über die unterschiedlichen U-Werte, da sich die Preise beider Glasarten in den letzten beiden Jahren angeglichen haben.

4.2 Wärmeversorgung von Gebäuden

Maßnahmen zur Reduzierung von Energie und Emissionen bei der Gebäudebeheizung und Warmwasserbereitung erfolgen erst nach einer wärmetechnischen Ertüchtigung des Gebäudes. Ein wesentlicher Grund ist, dass mit einem neuen Heizkessel zwar eine Einsparung von Energie und Emissionen erreicht wird, hierdurch aber nur die Wirkung (=Bereitstellung der Wärme) und nicht die Ursache (=hoher Wärmebedarf des Gebäudes) verändert wird. Ein zweiter Grund liegt in der Überdimensionierung der Heizungsanlage nach erfolgter Dämmung des Gebäudes, da hierdurch die Heizleistung merklich sinkt und damit nur eine Teilauslastung des Heizkessels erfolgt.

4.2.1 Modernisierung von Heizungsanlagen

Die Überdimensionierung der Heizungsanlage nach erfolgter Wärmedämmung des Gebäudes kann für einen modernen Kessel durchaus aber von Vorteil sein. Moderne Kesselanlagen arbeiten bei niedrigeren Vor- und Rücklauftemperaturen und benötigen somit größere Heizkörperflächen zur Übertragung der Wärmeleistung, gemessen am Leistungsbedarf des Gebäudes. Spätestens nach erfolgter Wärmedämmung des Gebäudes sind diese Heizkörperflächen vorhanden sind. In vielen Fällen sind diese Heizkörperflächen auch schon vor der Sanierung überdimensioniert, da die Heizkörpergröße früher meist der Fensterbreite und nicht der Raumgröße angepasst wurde.

Beim Einbau einer neuen Heizungsanlage kann zwischen einem Niedertemperatur- oder einem Brennwertkessel gewählt werden. Der Unterschied besteht in der Nutzung des im Abgas enthaltenen Wasserdampfes durch Kondensation und bedingt eine Rücklauftemperatur des Heizungssystems von idealer Weise 25°C . Bei höheren Vorlauftemperaturen läuft der Brennwertkessel als normaler Gas-

NT-Kessel und die Nutzung der Brennwertigkeit kann, wenn überhaupt, günstigstenfalls in einem kleinen Zeitbereich während der Übergangszeit im Frühjahr oder Herbst genutzt werden.

Der Brennwertkessel ist in der Regel teurer als ein NT-Kessel und erfordert unbedingt den Einzug eines feuchtigkeitsbeständigen, nicht rostenden Rohres in den Schornstein. Ohne diese Rohre würde der Kamin versotten, da durch die niedrigen Abgastemperaturen das Abgas im Kamin kondensiert.

In der Studie wird der Ersatz des vorhandenen Kessels durch einen NT-Kessel bzw. einen Brennwertkessel mit gleichem Energieträger angenommen.

Die zur Herstellung und Entsorgung notwendigen Energieaufwendungen bzw. die hierbei entstehenden Emissionen werden aus [25] abgeleitet, die Aufwendungen und Emissionen während der Nutzungsphase werden aus dem Hilfsenergiebedarf und dem eingesetzten Energieträger errechnet. Die aus [3] entnommenen Investitionskosten werden um die zur Kaminauskleidung notwendigen Kosten ergänzt.

4.2.2 Wärmepumpenheizungen

Der Einsatz von Wärmepumpen zur Wärmeversorgung stellt durch ihre inzwischen erreichte Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit eine Alternative zu den konventionellen Wärmeerzeugern dar. Man unterscheidet primär nach der Funktionsweise, also zwischen einer Kompressions- und einer Absorptionswärmepumpe und sekundär nach der Energiequelle, wobei Umgebungsluft, Erdreich, Grund- und Fließwasser in Betracht kommen.

Entscheidend für die Leistung der Wärmepumpe sind die Temperaturniveaus der Wärmequelle und des Heizkreisvorlaufes. Die Leistungszahl einer Wärmepumpe lässt sich für den idealen Carnot-Prozess mit folgender Formel darstellen:

Formel 4-3: Leistungszahl des Carnot-Prozesses

$$\epsilon_{\text{Carnot}} = \frac{T_{\text{WS}}}{T_{\text{WS}} - T_{\text{WQ}}}$$

mit T_{WS} : Temperatur der Wärmesenke (Heizkreisvorlauftemperatur)
 T_{WQ} : Temperatur der Wärmequelle

Für eine optimale Nutzung der Wärmepumpe ist eine hohe Leistungszahl ϵ erforderlich. Das maximal erreichbare ϵ erhält man nach Formel 4-3, in der Realität wird dieser Wert aber nie erreicht. Durch eine möglichst niedrige Temperatur der Wärmesenke (bedingt eine niedrige Vorlauftemperatur des Heizungssystems) und einer möglichst hohen Temperatur der Wärmequelle (über eine geeignete Auswahl wie Erdwärme oder Grundwasser erreichbar) kann die Arbeitszahl der Wärmepumpe über die Systemparameter beeinflusst werden.

Für die Untersuchung wird dabei eine Kompressionswärmepumpe gewählt, die zur Gebäudebeheizung und Warmwasserbereitung als monovalentes System verwendet wird. Sie beheizt mit der Temperaturpaarung von 40/ 30 °C für Vorlauf-/ Rücklauftemperatur das jeweilige Gebäude, das für diese geringen Vorlauftemperaturen geeignet sein muss. Als Wärmequellen dienen das Grundwasser, das über Förder- und Schluckbrunnen erschlossen wird, und Erdwärmesonden bzw. Grabenkollektoren, die im Garten des Gebäudes eingebracht werden.

Für den Betrieb einer monovalenten Wärmepumpe werden von den EVUs verbilligte Strompreise angeboten, die mit einem gesonderten Zähler erfasst werden, an dem aber nur die Wärmepumpe inklusive der Hilfsaggregate wie Umwälzpumpen o.ä. angeschlossen werden dürfen. Aufgrund der Netzspitzenlast kann der Strom für die Wärmepumpe von den EVU derzeit täglich maximal bis zu zwei Stunden gesperrt werden.

Die Aufwendungen zur Herstellung und Entsorgung sowie die dabei entstehenden CO₂-Emissionen entstammen der Quelle [16]; die während der Nutzung auftretenden Aufwendungen und entstehenden CO₂-Ausstöße werden direkt aus dem Stromverbrauch der Anlage berechnet. Der zum Antrieb der Wärmepumpe notwendige Strom, die Hilfsenergie und die Investitionskosten werden aus [3] abgeleitet.

4.2.3 Warmwasserbereitung durch Kollektoranlagen

Die Funktionsweise des Kollektors beruht darauf, einen möglichst großen Anteil der auf ihn einfallenden Globalstrahlung in nutzbare Wärme umzuwandeln, indem die durch den Kollektor gepumpte Sole erwärmt wird. Die in der Sole enthaltene Wärme wird anschließend über Wärmetauscher an das Brauchwasser abgegeben.

Nachteilig für die Kollektoren ist, dass mit steigender Rücklauftemperatur der Sole aus dem Warmwasserbereiter immer weniger Energie auf die Sole übertragen werden kann. Grund dafür ist die zu geringe Temperaturdifferenz zwischen der Kollektorfläche und der Solerücklauftemperatur. Gerade im Winter, aber auch in der Übergangszeit reicht die durch die Solaranlage eingebrachte Energiemenge zur Brauchwassererwärmung nicht aus, so dass über die konventionelle Heizanlage nachgeheizt werden muss. Der Energieeintrag der Solaranlage liefert somit auch in Zeiten geringer Außentemperatur kleine Deckungsanteile für die Warmwasserbereitung und trägt damit etwas zur Verbrauchsmin- derung von fossilen Energieträgern bei.

In unseren Breiten eignen sich Kollektoranlagen deshalb in erster Linie zur Warmwasserbereitung. Bei einer durchschnittlichen Temperatur des Frischwassers von etwa 10 °C und einer Auslegung von 1,5 m² Kollektorfläche pro Person können ca. 50 - 60 % des jährlichen Warmwasserbedarfs solar gedeckt werden.

Für die Betrachtung werden folgende vier Ausführungen von Kollektoren unterschieden.

Absorber sind die einfachste und kostengünstigste Form eines Kollektors, in der die durchfließende Sole von der Sonne erwärmt wird. Aufgrund der relativ schlechten Isolierung gegenüber der Umge- bung erreichen die Absorber maximale Stillstandstemperaturen von etwa 70 bis 90 °C und werden deshalb vorwiegend zur Erwärmung von Schwimmbädern, immer mehr aber auch zur Vorwärmung von Warmwasser verwendet.

Flachkollektoren stellen eine Weiterentwicklung von Absorbern dar, da der Absorber zur Vermeidung von Wärmeverlusten in einen wärmeisolierten Kasten mit transparenter Vorderseite eingebaut wird. Diese transparente Vorderseite muss auf der einen Seite das sichtbare Licht möglichst ohne Verluste hindurchlassen, auf der anderen Seite aber den Energieverlust durch die Infrarotstrahlung des warmen Absorbers an die Umgebung verhindern. Realisiert wird diese Vorderseite durch Glas, das auf der Innenseite mit einer für Infrarotlicht wirksamen Reflexionsschicht versehen wird.

Vakuum-Flachkollektoren weisen gegenüber den Flachkollektoren ein noch bessere Isolation gegenüber der Umgebung auf, indem das Kollektorgehäuse weitgehend evakuiert wird und dadurch die Konvektion fast vollständig unterbunden wird.

Bei **Vakuum-Röhrenkollektoren** befindet sich der Absorber in einer evakuierten, druckfesten Glasröhre. Die schon bei geringen Temperaturen verdampfende Flüssigkeit steigt als Flüssigkeitsdampf im Wärmerohr auf und gibt die aufgenommene Wärme über einen Wärmetauscher an die das Sammelrohr durchfließende Wärmeträgerflüssigkeit ab. Die kondensierte Flüssigkeit fließt anschließend wieder an das Wärmerohrende zurück. Mehrere einzelne hintereinandergeschaltete bzw. über eine Sammelleitung verbundene Röhren bilden den Sonnenkollektor.

Mit diesem Kollektor können schon bei geringen Temperaturdifferenzen zwischen der Heiz- und der Kühlzone gute Wirkungsgrade erreicht werden, so dass auch im Winter ein Teil der Warmwasserbereitung durch den Kollektor gedeckt wird.

Bei der Berechnung werden auf dem EFH 6 m², auf dem ZFH 12 m² und auf dem MFH 36 m² Kollektorfläche angenommen, für diese die jeweils optimale Kollektorart aus den vier Möglichkeiten ausgewählt wird.

Der Ertrag der Kollektoren wird mit [17] für jeden Gebäudetyp und jedes Gebäudebaujahr simuliert. Als Eingabegrößen werden zur Berechnung der Kollektorerträge das Testreferenzjahr TRY 8, für die Abschätzung der Leitungs- und Speicherverluste typische Materialwerte und zur Berechnung der Hilfsenergie typische Umwälzpumpenleistungen herangezogen.

Die energetischen Aufwendungen zur Herstellung bzw. die dabei auftretenden CO₂-Emissionen werden aus [18] abgeleitet, die zur Entsorgung notwendigen Aufwendungen sowie die hierbei entstehenden Emissionen werden nicht erfasst und können in der Regel jedoch vernachlässigt werden.

Die Investitions- und Montagekosten sowie Kosten für Regelung und Zubehör werden ebenfalls aus [3] entnommen. Die Kosten für die Hilfsenergie werden aus dem zum Betrieb der Umwälzpumpe notwendigen Strom berechnet.

Als Referenzsystem wird die Warmwassererwärmung über den NT-Kessel der konventionellen Heizungsanlage gewählt, die im Winter durch die Kollektoranlage unterstützt und im Sommer sogar ersetzt werden kann. Die Kosten für den somit eingesparten Brennstoff werden als Kosten für die Referenzanlage angesetzt, da die Abschreibung für die sowieso vorhandene Anlage inklusive Peripherie wegfallen.

4.2.4 Biogen befeuerte Heizungsanlagen

Biogen befeuerte Anlagen sind als Kachel-, Kaminöfen oder Küchenherde seit Jahrtausenden im Einsatz, die Nutzung als zentrale Heizungsanlage kam erst durch die Bemühung um eine verstärkte Nutzung von erneuerbaren Energien und den Ersatz von fossilen Energieträgern zum Tragen.

Zu den wichtigsten Energieträgern zählt das Holz, das vor allem in Form von Schwachholz bei der Waldbewirtschaftung, aber auch als Reststoff in der Holzver- und bearbeitenden Industrie anfällt. Für die energetische Nutzung dieses Holzes müssen daraus entweder Hackschnitzel oder Holzpellets gemacht werden. Inzwischen sind aber auch Heizungsanlagen auf dem Markt, die mit Stückholz betrieben werden können. Weitere mögliche Energieträger sind Stroh oder Heu.

Allen Heizungsanlagen gemein ist der erhöhte Platzbedarf für die Lagerung des Brennstoffes, da biogene Brennstoffe eine geringere Energiedichte pro Volumen wie Heizöl oder Erdgas aufweisen.

Die Regelung der Verbrennung erfolgt über die Primär- und Sekundärluft, Verbrennungsrückstände fallen in Form von Asche durch den Rost in den Aschebehälter. Der Aschebehälter muss entweder von Hand oder inzwischen durch einen automatischen Ascheaustrag regelmäßig geleert werden. Von den herkömmlichen Heizungsanlagen unterscheiden sich die biogen befeuerten in nachfolgende, für jeden Typ separat beschriebenen Merkmalen.

Pelletkessel

Holzpellets sind ein homogener Brennstoff mit hoher Energiedichte aus Sägewerks- oder Holzindustriearbeitsabfällen. Mit Pellets ist die Konstruktion einfacher und kostengünstiger Kessel möglich, da ein selbständiges Entnehmen des Brennstoffs aus dem Lagerraum und das Nachfüllen des Vorratsbehälters der Heizungsanlage über Förderschnecken, Schubstangen oder Saugzuggebläse möglich ist.

Der Brennstoff gelangt über eine Rückzündsicherung in die Brennkammer, in welcher der Brennstoff in der Regel auf einem Rost verfeuert wird. Hierdurch bieten Pelletkessel ähnlichen Heizkomfort wie Öl- und Gaskessel und benötigen für die Pelletlagerung unwesentlich mehr Platz als ein herkömmlicher Öltank.

Hackschnitzelkessel

Der Vorteil von Hackgutkesseln liegt in ihrem automatischen Brennstoffbeschickungssystem, das einen ebenso hohen Komfort garantiert wie Öl- oder Gaskessel. Hackgutkessel nach Stand der Technik sind mit einer Leistungsregelung ausgestattet und benötigen keinen Pufferspeicher. Ein Nachteil von Hackgutheizungen ist der relativ große Raumbedarf für die Lagerung von Hackgut aufgrund der geringen Energie- und Schüttdichte von Hackschnitzeln. Die möglichen Unterschiede bei der Brennstoffqualität erfordern eine robuste mechanische Ausführung und eine hochwertige elektronische Steuerung. Aus diesem Grund sind sie deutlich teurer als Pellet- oder Scheitholzessel.

Stückholzkessel

Beim Stückholzkessel muss im Gegensatz zu den beiden vorher genannten Kesseltypen der Brennstoff manuell in den als Vorratsbehälter dienenden Füllraum eingebracht werden. Der Brennstoff wird auf einem Rost, der meist am Boden des Füllraumes angeordnet ist, abhängig von der angeforderten Wärmeleistung verfeuert.

Holzvergaserkessel

Die Holzverbrennung erfolgt beim Holzvergaserkessel in einem zweistufigen Prozess: Vergasung in der ersten Stufe und Hochtemperaturverbrennung in einer eigenen Brennkammer in der zweiten Stufe. Zur Sicherstellung einer sauberen Verbrennung verwenden die meisten Hersteller eine Lambda-sonde, um die optimale Menge an Sekundärluft über verschiedene Zuluftöffnungen der Verbrennung zuzuführen.

Das Stückholz wird von oben in den Brennraum gelegt. Über ein Gebläse wird Luft (Primärluft) von oben durch das Holz gedrückt. Im unteren Teil des Kessels findet die Verbrennung statt: In einem Keramikblock wird das freigesetzte Holzgas verbrannt. Die Keramiksteine heizen sich dabei rotglühend auf und bewirken unter Zugabe von Sekundärluft eine optimale Nachverbrennung. Holzvergaserkessel vertragen keine Kohle, Koks, ungeordnete Holzreste oder Sägespäne. Der Kessel wird

generell bei Volllast betrieben und heizt Wasser in einem Pufferspeicher auf, aus dem eine kontinuierliche Wärmeabgabe erfolgt.

Für die Untersuchung werden die angeführten biogen befeuerten Kessel mit einem NT-Kessel verglichen. Hierbei wird davon ausgegangen, dass eine geeignete Leistungsklasse und ein ausreichend dimensionierter Lagerraum für den Brennstoff vorhanden ist.

4.2.5 Biomasse-Heizwerk

Die Möglichkeiten für den Einsatz von Waldrestholz in Großanlagen reichen von der Mitverbrennung in Heizkraftwerken bis hin zu reinen Hackschnitzelfeuerungsanlagen. Für dieses Beispiel wird ein Biomasseheizwerk gewählt, in dem durch die Verbrennung von Hackschnitzeln oder Restholz in den Spezialkesseln Wärme erzeugt wird. Die Wärme gelangt über erdverlegte Rohrleitungen in Form von Heißwasser zu den Abnehmern, bei denen die erforderliche Wärmemenge über Wärmetauscher aus dem Rohrsystem ausgekoppelt wird. Durch den Bau des Heizwerkes entfallen die dezentralen Heizkessel bei den einzelnen Abnehmern, dafür werden meist wandhängende Wärmeübergabestationen installiert.

Für dieses Beispiel wurde ein Biomasseheizwerk mit folgenden technischen Daten nach [19] gewählt:

Tabelle 4-1: Technische Daten des gewählten Heizwerkes

	Einheit	Biomasse-Kessel	Ölkessel für Spitzenlast und Reserve	Kondensationsanlage
Leistung	kW	2 x 1.000	1.900	340
Wärmeerzeugung	MWh/a	7.600	800	
Vollbenutzungsstunden	h/a	3.800	420	
Erzeugungsleistung	kW		4.240	
Wärmebedarf	kW		3.800	
Anschlußleistung	kW		5.000	
Nahwärmenetzlänge	m		5.078	

4.2.6 Blockheizkraftwerk

Eine vorwiegend mit Erdgas betriebene Verbrennungskraftmaschine treibt einen Generator an und erzeugt dadurch elektrischen Strom, der entweder direkt an den Verbraucher oder ins öffentliche Stromnetz abgegeben wird. Die Abwärme im Kühlwasser und im Motoröl der Verbrennungskraftmaschine, das Kühlmittel des Generators, das heiße Abgas und die erwärmte Luft innerhalb der BHKW-Kapsel werden über Wärmetauscher zur Heizwassererwärmung verwendet.

Diese Kraft-Wärme-Kopplung ist dann energetisch vorteilhaft, wenn das BHKW eine größtmögliche Wärmeabdeckung des Versorgungsobjektes bei hoher Stundenauslastung aufweist. Um dieses Ziel zu erreichen, bedarf es einer geeigneten Auslegung, da die meiste Wärme im Haushaltsbereich nur in der Heizperiode, im Sommer hingegen nur wenig Wärme zur Warmwasserbereitung benötigt wird.

Als Faustwert gilt eine Auslegung in Höhe von 30 % der Spitzenwärmeleistung, mit der das BHKW je nach Gebäude 60 % bis 80 % des Jahreswärmebedarfs bei 4.000 bis 6.000 Volllaststunden deckt. Die

restliche Wärme wird von einem Spitzenkessel erzeugt, der bei Ausfall oder bei Wartungsarbeiten des BHKWs die Wärmeerzeugung übernimmt.

Der Einbau einer BHKW-Anlage in ein einzelnes EFH oder ZFH empfiehlt sich aus Kosten- und Effizienzgründen nicht, da die vom BHKW erreichte Laufzeit zu kurz und die Investition zu teuer wäre.

anders stellt sich die Situation im MFH dar. Bei einer ausreichenden Größe des zu versorgenden Gebäudes kann die Warmwasserbereitung und ein Teil der Heizwärme durch ein BHKW erfolgen.

Es wird für diese Untersuchung angenommen, dass ein BHKW die Wärmeversorgung von 15 Gebäuden gleichen Gebäudetyps übernehmen soll. Die Wärmeleistung des BHKWs wird auf 30 % der benötigten Heizleistung festgelegt, der Anteil des BHKW am gesamten Wärmebedarf des Gebäudes inklusive Warmwasserbereitung soll 70 % betragen. Die restlichen 30 % des Wärmebedarfs werden durch den zu modernisierenden Spitzenkessel erzeugt.

Die elektrische Leistung des BHKWs errechnet sich aus [20] über die Stromkennzahl, von dem erzeugten Strom werden 10 % als Haushaltsstrombedarf direkt im zu versorgenden Objekt verbraucht, der Rest wird ins öffentliche Netz eingespeist und nach dem KWK-Gesetz vergütet. Der Hilfsenergiebedarf der gesamten Anlage wird aus dem öffentlichen Stromnetz bezogen und beträgt 4 % der Stromerzeugung durch das BHKW.

Die energetischen Aufwendungen sowie die Emissionen der Herstellungs- und Entsorgungsphase werden aus [25] über die Kesselnennleistung abgeschätzt. Während der Nutzung werden der Energieaufwand und die Emissionen aus dem Erdgas- und dem Hilfsenergieverbrauch berechnet bzw. für Schmierstoffe aus [25] nach der oben genannten Methode abgeschätzt.

Für das BHKW selbst werden Investitionskosten nach [21] und für den Pufferspeicher Pauschalwerte für den jeweiligen Gebäudetyp angesetzt; die Kosten für den Spitzenkessel werden mit Werten aus [3] angesetzt. Der Erdgaspreis wird mit 80 % der Kosten eines Privathaushaltes angesetzt, abzuziehen sind noch der Erdgassteueranteil. Die Stromeinspeisung wird nach dem KWK-Gesetz vergütet; hinzu kommt noch die Gassteuererstattung. Für den im Objekt verbrauchten Strom werden als Kosten die Differenz zwischen dem Strombezug aus dem öffentlichen Netz und der Einspeisevergütung nach dem KWK-Gesetz als Contracting-Vertrag zwischen dem Betreiber und den Objektbewohnern verrechnet.

4.2.7 Biogas-BHKW

Eine Sonderform des BHKWs stellt das Biogas-BHKW dar, das sich gerade im ländlichen Bereich für die Biogasnutzung anbietet. In einem Fermenter (Faulraum) wird durch Mikroorganismen aus Gülle und weiteren Bio-Abfällen wie Grasschnitt oder Fette Biogas und hochwertiger Dünger erzeugt. Das Biogas mit einem Methananteil von 55 bis 65 % wird in einem Gasspeicher gesammelt und zum Antrieb von Gas-Motoren verwendet.

Der Gasertrag ist abhängig von der Zusammensetzung des Substrates und kann mit Hilfe der beiden folgenden Tabellen (**Tabelle 4-2** und **Tabelle 4-3**) für beliebige Zusammensetzungen abgeschätzt werden.

Tabelle 4-2: Biogasertrag aus Tiergülle

	Gasertrag m³/(Stück*d)
Milchkuh	1,3
Rind	0,8
Sau	0,4
Mastschwein	0,2
Legehennen	0,0
Pferd	2,5
Schaf	0,4

Tabelle 4-3: Biogasertrag aus Bio-Abfällen

	Gasertrag m³/(kg*d)
Altfett	0,50
Speisereste	0,35
Schlempe	0,05
Grüngut	0,08
Stroh	0,12
Molke	0,05

Von der in einem BHKW erzeugten Wärme werden etwa 60 % für den Prozessenergiebedarf der Anlage aufgewendet, der Rest steht für die Beheizung von Gebäuden und die Warmwasserbereitung zur Verfügung. Der erzeugte Strom kann entweder zur Deckung des eigenen Strombedarfs im landwirtschaftlichen Betrieb genutzt oder aber einfach ins öffentliche Netz eingespeist werden. Besonders landwirtschaftliche Betriebe mit hohem eigenem Strom- und Wärmeverbrauch sowie Betriebe mit hohem Viehbestand bieten sich für die Installation einer Biogasanlage an. Die BHKWs werden hier gasgeführt gefahren, sie können aber auch gezielt zur Deckung von Lastspitzen bei genügend großem Gasspeicher herangezogen werden.

Für die Untersuchung wird der Dung von 80 Milchkühen und 5 Pferden sowie täglich 15 kg Altfett, 25 kg Speisereste und 100 kg Grüngut zur Biogasproduktion angesetzt.

4.3 Minderung von Stromverbrauch und –bezug

Diese Maßnahmengruppe umfasst Beispiele zur Verminderung von Stromverbrauch bzw. Strombezug durch Stromsparmaßnahmen und Stromeigenerzeugung. Es wird aufgezeigt, welche Strommenge mit der Durchführung unterschiedlicher Techniken vermindert werden kann bzw. welche Strommenge durch die untersuchten Techniken selbst erzeugt werden kann.

4.3.1 Blockheizkraftwerk

Das Blockheizkraftwerk stellt eine Maßnahme zur Stromeigenerzeugung dar und wurde bereits unter Kapitel 4.2.6 behandelt.

4.3.2 Photovoltaikanlagen

Eine Photovoltaik-Anlage besteht aus den Solarmodulen inklusive Aufständerung, einem Wechselrichter mit integrierter Regeleinheit zur Umwandlung des Gleichstromes in den netzüblichen Wechselstrom und Einspeisung des erzeugten Stromes in das öffentliche Stromnetz, einer Blitzschutzeinrichtung sowie der gesamten Verkabelung. Im Wechselrichter ist meist noch eine Messeinrichtung integriert, die dem Nutzer verschiedene Daten wie Einstrahlung, Modulleistung usw. zur Verfügung stellt.

Die Erzeugung von Strom aus Photovoltaikanlagen ist derzeit noch eine sehr teure Variante zur Vermeidung von Strombezug aus dem öffentlichen Netz. Als Gründe für die hohen Stromerzeugungskosten bei dieser Technik sind die in Bayern vergleichsweise niedrige solare Einstrahlung und die mittlere jährliche Sonnenscheindauer gegenüber Standorten in sonnigeren Breiten wie Italien oder Nordafrika. Weiter sind zu nennen der relativ geringe Jahresnutzungsgrad der PV-Module mit dem damit verbundenen hohen Flächenbedarf sowie die hohen Investitionen.

Als Vorteile können hier die inzwischen von den Herstellern garantierte Lebensdauer von mehr als 20 Jahren, zum Teil sogar schon 30 Jahre und der weitgehend eigenständige Betrieb der Anlage nach erfolgter Installation gesehen werden.

Für den Quervergleich mit anderen Systemen werden die mittleren klimatischen Verhältnisse für Bayern angesetzt. Auf die 30° gegenüber der Horizontalen geneigten Module, die genau nach Süden ausgerichtet sind, werden pro Jahr knapp 1.200 kWh pro m² eingestrahlt. Zur Auswahl stehen amorphe, mono-kristalline, poly-kristalline und EFG-Zellen, aus denen für jeden Gebäudetyp die jeweils optimale Art ausgewählt wird. Beim EFH werden etwa 8 m², beim ZFH etwa 16 und beim MFH etwa 40 m² Modulfläche installiert.

Der erzeugte Gleichstrom wird über Wechselrichter in Wechselstrom gewandelt und zu 100 % ins öffentliche Stromnetz eingespeist, das auch gleichzeitig als Referenzsystem dient. Der eingespeiste Strom wird nach dem EEG vergütet und verdrängt die gleiche Menge an Strom aus dem bayerischen Strommix.

Für die Herstellung wird nach [22] pro kWh erzeugtem Solarstrom 0,56 kWh an PE für mono-kristalline und EFG-, 0,40 kWh für poly-kristalline und 0,30 kWh für amorphe Zellen angesetzt; die dabei entstehenden Emissionen resultieren aus den energetischen Aufwendungen bei der Herstellung. Hier werden die Aufwendungen zu 80 % aus Strom und jeweils zu 10 % aus Erdgas und Heizöl gedeckt, so dass der für den Produktionsort zugehörige Strom einen unter Umständen wesentlichen Einfluss auf die bei der Herstellung entstehenden Emissionen hat. Für die Entsorgung der Module und der restlichen Komponenten liegen noch keine Daten vor, so dass hierüber keine Aussagen getroffen werden können.

Die Kosten der PV-Anlagen inklusive Aufständerung, Verkabelung und Wechselrichter wurden aus [23] und [24] ermittelt, die Montage wird beim EFH mit 850 €, beim ZFH mit 1.700 € und beim MFH mit 3.400 € veranschlagt.

4.3.3 Kompakt-Leuchtstofflampen (KLL)

Der Ersatz von konventionellen Glühlampen durch Kompaktleuchtstofflampen (KLL, üblicherweise als „Energiesparlampe“ bezeichnet) wurde während der Markteinführungsphase von vielen Nutzern nach anfänglicher Euphorie wieder rückgängig gemacht, da sie mit der Form, der Lichtfarbe und der Auf-

wärmzeit bis zur vollen Lichtleistung unzufrieden waren. Inzwischen gibt es KLL in verschiedensten Formen und Lichtfarben und die Aufwärmzeit wird bei guten Lampen durch eine Elektronik auf wenige Sekunden reduziert. Aus Gewohnheit und den höheren Anschaffungskosten der Lampe werden aber bei vielen Nutzern immer noch Glühlampen bevorzugt.

Der wesentliche Unterschied der beiden Lampentypen besteht in der Lichterzeugung. Die Glühlampe erzeugt ihr Licht durch eine Wolframwendel, von der sich im Lauf der Betriebszeit immer mehr Wolfram löst, bis nach etwa 1.000 Normalbetriebsstunden die Wendel so dünn wird, dass sie meist beim Einschalten der Lampe reißt.

Die KLL hingegen stellt eine Miniatur-Leuchtstofflampe dar, bei der zunächst UV-Licht über eine Gasentladung erzeugt wird und dann eine Umwandlung in sichtbare Strahlung über den Leuchtstoff erfolgt. Die Lebensdauer dieser Lampentypen wird durch das Verdampfen der Anheizelektroden begrenzt, liegt aber etwa 10- bis 15-mal so hoch wie bei Glühlampen, da die Elektroden nur beim Starten der Lampen benötigt werden.

Im behandelten Beispiel werden vier marktgängige Kompaktleuchtstofflampen [27] mit der Produktbezeichnung Longlife, Economy, Classic und Economy Classic einer Allgebrauchsglühlame gegenübergestellt. Die vier Lampen unterscheiden sich durch ihre Form und die erwartete Lebensdauer.

Für die Berechnung wird eine jährliche Brenndauer von 500 h angesetzt, so dass die Glühlampe nach zwei Jahren ersetzt werden muss, die KLL halten 8.000 h länger. KEA und Emissionsmenge werden in der Herstellungs- und Entsorgungsphase mit Hilfe von [9] und [26] abgeschätzt, in der Nutzungsphase wird der Stromverbrauch der jeweiligen Lampe dafür herangezogen. Die Kosten der Lampen entsprechen den marktüblichen Preisen, die Abschreibung erfolgt über die Lebensdauer der KLL mit der längsten Brenndauer.

Es wird davon ausgegangen, dass jeweils nur eine Lampe (neu-)gekauft wird und somit nur die jährlichen Kosten und nicht die aus einer Lagerhaltung resultierenden Kosten verzinst werden müssen. Weitere Kostenarten fallen bei der KLL aufgrund der Differenzbetrachtung zur Glühlampe nicht an.

4.4 Aufbau und Struktur der Maßnahmenberechnung

Die Berechnung der Maßnahmen und Hochrechnung zum Potential geschieht nach dem in **Bild 4-1** aufgezeigten Schema.

Die jeweiligen Daten der Typgebäude und Wärmeerzeuger (siehe Kapitel 5) werden in das Eingabblatt übernommen, von welchem sie als Kenngrößen zu den einzelnen Maßnahmen verknüpft sind. Anschließend werden für jede einzelne Maßnahme die im Folgenden erläuterten Berechnungsschritte durchgeführt, aus denen mit Hilfe des Bewertungsverfahrens (Kapitel 2.8) schließlich die jeweils optimalen Maßnahmen aus einem Maßnahmenbündel herausgefiltert und in die Ergebnisübersicht übernommen werden.

Nach dem Durchlauf aller möglichen Kombinationen von Typgebäuden, Wärmeerzeugern und Energieträgern werden die Ergebnisse mit den entsprechenden Bestandszahlen aus der Strukturanalyse und den Rahmenbedingungen aus Kapitel 7.1 zu Einzelfallpotentialen zusammengeführt. Das Gesamtpotential schließlich wird durch Summation der Einzelfallpotentiale ermittelt.

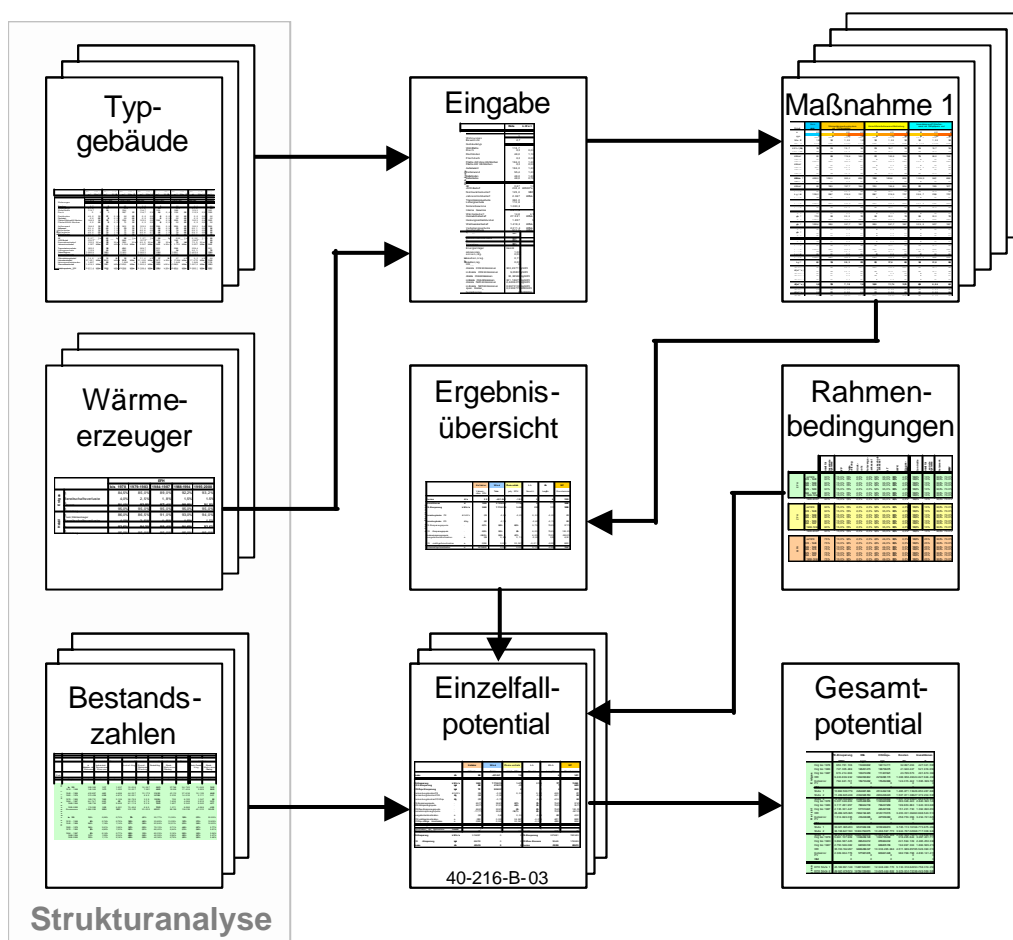


Bild 4-1: Schema bei der Maßnahmenberechnung

Für die Einzelberechnung von verschiedenen Maßnahmen wurden in einer Voruntersuchung [12] standardisierte Tabellenblätter entwickelt, die für diese Untersuchung übernommen und um einige Komponenten erweitert wurden.

Die Berechnung der Maßnahmen und der jeweiligen Referenzsysteme erfolgt parallel zueinander und lässt sich in folgende Gruppen einteilen:

- Kenngrößen
- KEA
- CO₂
- CH₄
- N₂O
- CO₂Äqu
- Kosten
- Vergleich
- Ergebnis

Aufbau und Struktur der Maßnahmenberechnung sollen exemplarisch für alle Maßnahmen mit dem nachfolgenden Beispiel aufgezeigt werden, bei dem in einem EFH (Baujahr vor 1918) ein Heizölkessel (Baujahr vor 1978) durch einen modernen Holzpelletkessel ersetzt werden soll, wobei keine Förderungen berücksichtigt werden.

In der ersten Maßnahmenblattgruppe, als „**Kenngößen**“ bezeichnet, werden allgemeine Kenndaten der Maßnahmen und des Referenzsystems wie die technische Lebensdauer oder die für diese Maßnahme angesetzte Temperaturpaarung angeführt, bevor dann die Daten des Typgebäudes und des Wärmeerzeugers (siehe Kapitel 5) eingesetzt werden. Hierbei werden die zur Berechnung erforderlichen Daten wie Wärme- oder Warmwasserbedarf des Gebäudes (27.561 bzw. 3.941 kWh) aus dem entsprechenden Typgebäude entnommen. Ergänzt werden sie durch die Daten der Referenz-Heizungsanlage (Nennwirkungsgrad 90,6 %, Jahresnutzungsgrad 86,1 %, Instandhaltungsaufwand 2,0 % oder Hilfsenergie der Heizungsanlage 402,8 kWh). Mit den Daten aus dem Typgebäude werden über den mittleren Nenn- und Jahresnutzungsgrad des Pelletkessels (86,4 % bzw. 82,1 %) der Gesamtenergiebedarf (38.380 kWh) des Gebäudes nach Durchführung der Maßnahme errechnet. Zusätzlich werden der Pelletspeicher in der Heizungsanlage (150 l), der gesamte Jahrespelletbedarf (3.553,3 kg), der Lagerbedarf im Gebäude bei 2,5 m Raumhöhe (2,7 m²) und die Anzahl der Pelletnachfüllungen (70.285) ausgewiesen. Die Anzahl der Pelletnachfüllungen wird zusammen dem spezifischen Hilfsenergiebedarf für Wärmeerzeugung zur gesamten Hilfsenergie (2.176 kWh/a) des Kessel hochgerechnet.

Tabelle 4-4: Bereitstellung der Kenngrößen bei der Maßnahmenberechnung

		EFH	EFH
		Heizöl	Holzpellets
Kenngrößen	Wärmeerzeuger		
	technische Lebensdauer	a	20
	Temperaturpaarung	°C	70/50
	Warmwasserspeichergroße	l	150
	Nennleistung für Modellgebäude	kW	15
	Hilfsgröße für Leistungsbereich	ohne	1
	Wärmebedarf Gebäude	kWh/a	27.561
	Nennwirkungsgrad	ohne	90,6%
	Jahresnutzungsgrad	ohne	86,1%
	Warmwasserbedarf Gebäude	kWh/a	3.941
	Gesamtenergiebedarf	kWh/a	36.606
	Instandhaltungsaufwand	ohne	2,0%
	Größe Pelletspeicher	l	
	Pelletbedarf	kg/a	
	Lagerbedarf im Gebäude	m ²	
	Anzahl Pelletnachfüllungen	Stück/a	
	Hilfsenergie Regelung	kWh/a	131,4
	Hilfsenergie Brenner	kWh/a	271,4
	Hilfsenergie Umwälzpumpe	kWh/a	.
	Hilfsenergie Zirkulation	kWh/a	0,0
Hilfsenergie Kessel	kWh/a	402,8	
Hilfsenergie gesamt	kWh/a	402,8	

Der **KEA** und die vier untersuchten **Emissionsarten** bilden die nächsten Gruppen der Berechnung und werden jeweils nach Herstellung, Nutzung und Entsorgung für die gesamte Lebensdauer dieser Maßnahme berechnet nach der in Kapitel 2.3 und 2.4 beschriebenen Methodik berechnet.

Die Werte für die Herstellung und die Entsorgung der untersuchten Techniken, welche entweder aus [9] stammen, werden über die Nennleistung auf die benötigte Größe skaliert.

Tabelle 4-5: Berechnung von KEA und KEm bei der Maßnahmenberechnung

KEA	$KNRA_H$	GJ	6,1	13,4
	KRA_H	GJ	0,0	0,0
	$KNRA_{NI}$	GJ	2.664,7	117,5
	KRA_{NI}	GJ	0,0	2.072,5
	$KNRA_{NA}$	GJ	355,2	294,6
	KRA_{NA}	GJ	0,0	0,0
	$KNRA_E$	GJ	0,1	0,2
	KRA_E	GJ	0,0	0,0
	KEA gesamt	GJ	3.026,0	2.498,2
	davon KRA	GJ	0,0	2.072,5
davon KNRA	GJ	3.026,0	425,7	
$KNRA_{fix}$	GJ	6,2	13,5	
$KNRA_{var}$	GJ/a	151,0	27,5	
CO ₂	KEm_{CO_2-H}	t	0,2	0,2
	KEm_{CO_2-Nd}	t	219,8	29,4
	KEm_{CO_2-Ni}	t	8,0	18,3
	KEm_{CO_2-E}	t	0,0	0,0
	KEm_{CO_2}	t	228,0	47,9
	KEm_{CO_2-i}	t	8,2	18,5
	KEm_{CO_2-fix}	t	0,2	0,2
	KEm_{CO_2-var}	t/a	11,4	3,2
CH ₄	KEm_{CH_4-H}	kg	1,1	1,1
	KEm_{CH_4-Nd}	kg	22,2	86,1
	KEm_{CH_4-Ni}	kg	233,2	71,9
	KEm_{CH_4-E}	kg	0,0	0,0
	KEm_{CH_4}	kg	256,6	159,1
	KEm_{CH_4-i}	kg	234,3	73,0
N ₂ O	KEm_{N_2O-H}	kg	0,0	0,0
	KEm_{N_2O-Nd}	kg	1,8	9,3
	KEm_{N_2O-Ni}	kg	0,7	1,3
	KEm_{N_2O-E}	kg	0,0	0,0
	KEm_{N_2O}	kg	2,5	10,6
	KEm_{N_2O-i}	kg	0,7	1,3
CO ₂ -Äquivalent	$KEm_{CO_2\ddot{A}qu-H}$	t	0,2	0,2
	$KEm_{CO_2\ddot{A}qu-Nd}$	t	220,8	34,2
	$KEm_{CO_2\ddot{A}qu-Ni}$	t	13,1	20,2
	$KEm_{CO_2\ddot{A}qu-E}$	t	0,0	0,0
	$KEm_{CO_2\ddot{A}Qu}$	t	234,2	54,7
	$KEm_{CO_2-i\ddot{A}u}$	t	13,3	20,4
	$KEm_{CO_2\ddot{A}qu-fix}$	t	0,2	0,2
	$KEm_{CO_2\ddot{A}qu-var}$	t/a	11,7	3,6

Beim KEA wird ein Kumulierter Regenerativer Aufwand und ein Kumulierter Nicht-Regenerativer Aufwand unterschieden, um die Nutzung von regenerativen Energien eindeutig angeben zu können. Die Nutzungsphase wird zusätzlich in den Bereich innerhalb des Bilanzraumes (Index i) und den Bereich außerhalb des Bilanzraumes (Index a) aufgliedert, um Aussagen über Verbräuche innerhalb und außerhalb des Bilanzraumes tätigen zu können. Sie wird nach folgender Methode berechnet:

Formel 4-4: Berechnung des K(N)RA

$$K(N)RA_{Nk} = (W_{BS_ges} * a_{ee_k} + W_{HE_ges} * a_{HE_k}) * L \quad [GJ]$$

mit: $K(N)RA_{Nk}$ = Kumulierter (Nicht-)Energetischer Aufwand der Nutzungsphase für k [GJ]

W_{BS_ges} = gesamter Brennstoffbedarf [kWh/a]

a_{ee_k} = Aufwandszahl des eingesetzten Energieträgers [-]

W_{HE_ges} = gesamter Hilfsenergiebedarf [kWh/a]

a_{HE_k} = Aufwandszahl der für die Hilfsenergie eingesetzten Energieträgers [-]

L = technische Lebensdauer der Maßnahme a

k = Bilanzraumzuordnung (i = innerhalb, a = außerhalb)

Das CO₂-Äquivalent wird aus der gewichteten Summe der Einzelemissionen ermittelt (siehe Kapitel 2.4). Für die Errechnung der Amortisationen ist es erforderlich, beim KEA, bei den CO₂-Emissionen und beim CO₂-Äquivalent jeweils einen Fixanteil (Herstellung und Entsorgung) und einen variablen Anteil (Nutzungsphase) auszuweisen, wobei beim KEA für die folgenden Berechnungen nur noch der KNRA betrachtet wird (siehe Kapitel 2.3).

Nach den Emissionen erfolgt die Berechnung der **Kosten** nach dem in Kapitel 2.6 vorgestellten Verfahren. Die annuitätisch über die technische Lebensdauer abgeschriebenen Gesamtinvestitionen (5.795 € bzw. 10.209 €) bilden die Jahreskapital-Gesamtkosten (505,3 bzw. 1.051,20 €), welche zusammen mit den Wartungskosten (115,9 € bzw. 255,2 €) und den Hilfsenergiekosten des Kessels (65,4 bzw. 353,7 €), dem Grundpreis des Energieträgers (Heizöl, deshalb 0,0 €) und den Brennstoffkosten (1.123,0 bzw. 1.425,5 €) die Maßnahmengesamtkosten (1.809,6 bzw. 3.085,6 €) ergeben. Auch hier werden für die spätere Amortisationsberechnung der Fixanteil (aus den Jahreskapital-Gesamtkosten, den Wartungskosten und dem Grundpreis für den Energieträger) und der variable Teil (aus den Hilfsenergie- und den Brennstoffkosten) der Kosten ausgewiesen.

Tabelle 4-6: Ermittlung der Kosten bei der Maßnahmenberechnung

Kosten	Gesamtinvestitionen	€	5.795,5	10.209,1
	berücksichtigte Fördermittel	€	0,0	0,0
	Jahreskapital-Gesamtkosten	€/a	505,3	1.051,2
	Wartung Kessel	€/a	115,9	255,2
	Hilfsenergie Kessel	€/a	65,4	353,7
	Grundpreis Energieträger	€/a	0,0	0,0
	Brennstoffkosten	€/a	1.123,0	1.425,5
	Maßnahmengesamtkosten	€/a	1.809,6	3.085,6
	k_{fix}	€/a	621,2	1306,4
k_{var}	€/a	1188,4	1779,2	

In der nächsten Gruppe, dem **Vergleich**, wird die lebenszyklische Betrachtung der Systeme auf die jährliche Betrachtung durch Division der erforderlichen Einzelwerte mit der Lebensdauer umgestellt, was aufgrund der Vergleichbarkeit von Maßnahmen mit unterschiedlichen technischen Lebensdauern und der jährlichen Betrachtung der Kosten notwendig ist.

Der Vergleich erfolgt durch Saldierung der jeweiligen, auf ein Jahr umgerechneten Positionen. Es wird dabei davon ausgegangen, dass die neue Maßnahme eine Einsparung an Energie und Emissio-

nen hervorruft, weshalb bei diesen Positionen ein Minuszeichen keine Einsparung, sondern eine Erhöhung des Energieverbrauches oder der Emissionen bedeutet. Bei den Kosten hingegen ist es umgekehrt - die neue Maßnahme im Regelfall teurer als die alte; deswegen werden hier die Mehrkosten ausgewiesen. Ein Minuszeichen bedeutet hier also eine Kosteneinsparung gegenüber der alten Maßnahme.

Tabelle 4-7: Vergleich der Systeme bei der Maßnahmenberechnung

Vergleich	Einsparung PE	GJ/a	0	122,9
	Einsparung $K_{Em_{CO_2,d}}$	kg/a	0	9.027,9
	Einsparung $K_{Em_{CO_2,i}}$	kg/a	0	-823,1
	Einsparung $K_{Em_{CO_2-Äqu,d}}$	kg/a	0	8.760,6
	Einsparung $K_{Em_{CO_2-Äqu,d}}$	kg/a	0	-695,6
	Mehrkosten	€/a	0	1.276,0

Mit den so erhaltenen Werten werden die in Kapitel 2.7 beschriebenen Größen errechnet (Gruppe **Ergebnis**), wobei hier keine Unterscheidung mehr in direkte und vorgelagerte Emissionen erfolgt. Zusätzlich werden noch die gesamte Einsparung für PE, CO_2 und $CO_{2Äqu}$ angegeben.

Tabelle 4-8: Ergebnisaufstellung bei der Maßnahmenberechnung

Ergebnis	PE-Einsparung	kWh/a		34.145
	CO_2-Einsparung	kg/a		8.205
	$CO_{2Äqu}$-Einsparung	kg/a		8.065
	Vermeidungskosten PE	€/kWh		0,04
	Vermeidungskosten CO_2	€/kg		0,16
	Vermeidungskosten $CO_{2Äqu}$	€/kg		0,16
	PE-Einsparungsquote	.		85,9%
	CO_2 -Einsparungsquote	.		79,0%
	$CO_{2Äqu}$ -Einsparungsquote	.		76,7%
	Kosteneinsparungsquote	.		-70,5%
	energetische Amortisation	a		0,892
	CO_2 -mäßige Amortisation	a		0,000
	$CO_{2Äqu}$ -mäßige Amortisation	a		0,000
kostenmäßige Amortisation	a		.	

Im letzten Teil des Maßnahmenblattes (hier nicht mehr dargestellt) erfolgt die Auswahl der nach den getroffenen Zielgrößen optimalen Maßnahme über das in Kapitel 2.8 beschriebene Bewertungsverfahren. Hierzu werden alle Maßnahmen mit dem Extremum der Zielgröße verglichen. Das Extremum ist im Falle von Einsparungen oder Einsparungsquoten das Maximum, in den anderen Fällen das Minimum aller Maßnahmen mit dieser Zielgröße. . Hierbei bleiben Maßnahmen, bei denen bei einem der drei Kriterien Primärenergie-, CO_2 - und $CO_{2Äqu}$ -Einsparung ein Mehrausstoß gegenüber dem Ausgangszustand auftritt, für die Hochrechnung unberücksichtigt, da die Durchführung von Maßnahmen eine Minderung von allen drei Kriterien erreichen sollte.

Bei Identität der Maßnahme mit dem Extremum aller Maßnahmen in dieser Zielgröße wird der durch das Bewertungsverfahren vorgegebene Prozentsatz eingetragen, anderenfalls Null. Die Maßnahme mit der höchsten Summe dieser Prozentsätze ist das Optimum unter den getroffenen Bewertungskriterien und wird für die Potentialabschätzung weiterverwendet.

5 Strukturanalyse der Haushalte als Grundlage für Potentialabschätzungen

Für die Abschätzung von Energie- und Emissions-Einsparpotentialen ist es erforderlich, nicht nur den gesamten Energiebedarf oder die gesamte Emissionsmenge zu kennen, sondern die genaue Struktur innerhalb dieses Sektors. Aus diesem Grunde wird mit der in diesem Kapitel beschriebenen Vorgehensweise eine Struktur erarbeitet, auf deren Grundlage dann weitere Berechnungen durchgeführt werden. Hierzu wird zuerst die Wohngebäudestruktur in Bayern ermittelt, mit der dann Typgebäude für ein Modell der bayerischen Haushalte gebildet werden können. Mit diesem Modell kann schließlich die Struktur der bayerischen Haushalte in Bezug auf Energieverbrauch und Emissionen angegeben werden.

5.1 Wohngebäudestruktur in Bayern

Die Gebäudestruktur für das Jahr 2000 ist für Bayern statistisch nicht ausgewiesen, sondern muss anhand statistischer Daten über den Wohnungsbestand und die jährlichen Neuerrichtungen sowie über angepasste Lebensdauern und Renovierungszyklen von Anlagen und Gebäuden aus der Gebäude- und Wohnungszählung 1987 errechnet werden. Diese Berechnung wird auf Grundlage einer Untersuchung [31] durchgeführt, doch werden aktuelle Zahlen eingesetzt und verschiedene Annahmen wie Warmwasserbedarf oder Kesselnutzungsgrade durch statistische Daten ersetzt.

Grundlage bildet die Wohnungszählung 1987, in der die Wohnfläche, das Baualter und der technische Stand der Wohngebäude sowie die Art der Beheizung und der Warmwasserbereitung detailliert erfasst sind. Daten über Zubau, Abbruch und Modernisierung von Anlagen und Gebäuden aus [31] werden mit aktuellen Daten aus [32] ersetzt bzw. ergänzt.

Der Wohnungsbestand, die Wohnfläche und die Verteilung der Heizungsarten und Energieträger des jeweiligen Jahres werden, beginnend mit dem Jahr 1988, jeweils aus dem vorhergehenden Jahr bis hin zum Jahr 2000 nach dem in [31] entwickelten Berechnungsalgorithmus ermittelt, welcher sich wie folgt darstellen lässt:

Formel 5-1: Berechnung der Bestandszahlen

$$[A_{\text{Bestand}}]_{j,k,l,m} = [A_{\text{bestand}}]_{(j-1),k,l,m} - [A_{\text{abriss}}]_{j,k,l,m} + [A_{\text{zubau}}]_{j,k,l,m} \pm [A_{\text{gebmodern}}]_{j,k,l,m} \pm [A_{\text{anlmodern}}]_{j,k,l,m}$$

mit: $A_{\text{Bestand, Jahr}}$ = Bestandszahl im Jahr j für Wohneinheiten und Wohnflächen

A_{Bestand} = Bestandszahl im Vorjahr

A_{Abriss} = Anzahl der Gebäudeabriss

A_{Zubau} = Anzahl des Gebäudezubaues

$A_{\text{Gebmodern}}$ = Anzahl der modernisierten Gebäude

$A_{\text{Anlmodern}}$ = Anzahl der modernisierten Anlagen

j = Jahr

k = Gebäudetyp (EFH, ZFH, MFH, Wohnheime oder Sonstige)

l = Gebäudebaualterklassen

m = Beheizungsarten der Gebäude

Die Anzahl der Gebäudeabrisse und des Gebäudezubaues für die einzelnen Gebäudebaualterklassen und Beheizungsarten errechnen sich durch die Aufteilung von statistischen Daten mittels Abriss- und Zubaumatrizen, welche entsprechend den zu erwartenden Veränderungen im Bestand aus [31] übernommen werden.

Analog hierzu werden auch die Anzahl der modernisierten Gebäude und Anlagen berechnet, welche durch Verschiebung von älteren Baualterklassen in neuere realisiert werden.

Als Ergebnis all dieser Berechnungen erhält man die Anzahl der Wohnungen und die Wohnflächen, aufgeteilt nach Gebäudetyp, Gebäudebaualterklasse und Beheizungsart.

Wohnungs- und Wohnflächenbestand, mittlere Wohnfläche

In der **Tabelle 5-1** ist das Ergebnis der Fortschreibung der Gebäudestruktur zusammengefasst. Im Jahr 2000 gab es in Bayern knapp 5,5 Mio. Wohnungen, die zu rund 97 % in reinen Wohngebäuden lagen. Fast 31 % aller Wohnungen befanden sich in Einfamilienhäusern, knapp 20 % in Zweifamilienhäusern und etwas mehr als 46 % in Mehrfamilienhäusern. Insgesamt standen 482,3 Mio. m² Wohnfläche zur Verfügung, von denen rund 469 Mio. m² oder rund 97 % in reinen Wohngebäuden lagen. Der Anteil der EFH bei der Wohnfläche lag bei 42,8 %, der von ZFH bei 19,7 % und der von MFH bei 34,7 %.

Man erkennt daraus, dass bei den EFH dem Wohnungsanteil von 30,8 % ein Wohnflächenanteil von 42,8 % gegenübersteht, was aufgrund der größeren Wohnfläche pro Wohnung in Einfamilienhäusern gegenüber der in MFH erklärbar ist. Bei den Zweifamilienhäusern ist das Verhältnis weitgehend ausgeglichen, bei den MFH stehen dem Wohnungsanteil von 46,4 % ein Wohnflächenanteil von 34,7 % gegenüber.

Die mittlere Wohnungsgröße lag im Jahr 2000 in Bayern bei 88,2 m²; die EFH lagen mit durchschnittlich 122,4 m² fast 40 % über, die ZFH mit 87,4 m² mit 99 % leicht unter und die MFH mit 25 % deutlich unter dem Mittelwert.

Tabelle 5-1: Wohnungs- und Wohnflächenstruktur in Bayern im Jahr 2000

	Wohnungen		Wohnfläche		mittl. Wohnungsgröße	
	Anzahl	Anteil	1.000 m ²	Anteil	m ²	Relation
Gesamt	5.471.570	100,0%	482.342	100,0%	88,2	100,0%
davon in						
Wohngebäuden	5.314.366	97,1%	469.014	97,2%	88,3	100,1%
davon in						
EFH	1.686.295	30,8%	206.424	42,8%	122,4	138,9%
ZFH	1.088.472	19,9%	95.117	19,7%	87,4	99,1%
MFH	2.539.599	46,4%	167.473	34,7%	65,9	74,8%
Nichtwohngebäuden mit Wohnraum	157.204	2,9%	13.328	2,8%	84,8	96,2%
davon in						
Wohngeb. m. 1 od. 2 Freizeit-WE	19.073	0,3%	1.831	0,4%	96,0	108,9%
Wohnheime	20.031	0,4%	553	0,1%	27,6	31,3%
Sonst. Gebäude mit Wohnraum	118.100	2,2%	10.943	2,3%	92,7	105,1%

Verteilung der Wohneinheiten und Wohngebäude über die Baualtersklassen

Das Ergebnis für die Verteilung der Baualtersklassen innerhalb der Wohneinheiten ist in der **Tabelle 5-2** dargestellt. Dabei ist auffällig, dass die meisten Gebäude in den Baualtersklassen 1949 bis 1968 und 1969 bis 1978 gebaut wurden. Der Anteil liegt hier zwischen 31,3 % bei den Sonstigen Gebäuden und 51,4 % bei den MFH.

Tabelle 5-2: Verteilung der Wohneinheiten über die Baualtersklassen und Gebäudearten in Bayern im Jahr 2000

	EFH	ZFH	MFH	Sonstige
bis 1918	12,4%	11,7%	10,3%	30,7%
1919 - 1948	8,6%	11,1%	7,2%	9,1%
1949 - 1968	24,4%	32,1%	32,7%	20,6%
1969 - 1978	18,6%	16,4%	18,7%	10,7%
1979 - 1983	9,5%	6,7%	5,0%	4,8%
1984 - 1987	5,0%	3,3%	3,7%	3,0%
1988-1994	11,2%	9,8%	11,0%	11,2%
Neubau	10,3%	8,8%	11,5%	10,0%

Diese Verteilung wird in dieser Untersuchung zur Errechnung der Altersstruktur der Wohngebäude (**Tabelle 5-3**) verwendet, da hierfür keinerlei statistische Daten vorhanden sind.

Tabelle 5-3: Struktur des Wohngebäudebestandes in Bayern im Jahr 2000

	EFH Anzahl	ZFH Anzahl	MFH Anzahl	Gesamt Anzahl
bis 1918	209.355	63.524	43.467	316.346
1919 - 1948	145.383	60.423	36.496	242.302
1949 - 1968	410.657	174.949	97.621	683.226
1969 - 1978	313.428	89.460	57.920	460.808
1979 - 1983	159.731	36.701	19.487	215.919
1984 - 1987	84.747	17.931	13.520	116.198
1988-1994	188.734	53.529	40.360	282.623
Neubau	174.260	47.721	41.686	263.667
Zusammen	1.686.295	544.236	350.557	2.581.089
Anteil	65,3%	21,1%	13,6%	100%

Aus den Angaben über den gesamten Wohngebäudebestand pro Gebäudeart aus [32] wird mit dieser Verteilung die Struktur des Wohngebäudebestandes für das Jahr 2000 errechnet, indem der gesamte Gebäudebestand innerhalb eines Gebäudetyps mit dem entsprechenden Anteil der Wohneinheiten am Gesamtbestand multipliziert und durch die mittlere Anzahl der Wohnungen pro Gebäude aus [33] dividiert wird. Hierbei wird angenommen, dass die Verteilung der Wohneinheiten über die Baualtersklassen gleich der Verteilung der Wohngebäude ist und die bundesdurchschnittliche Anzahl der Wohnungen direkt auf Bayern übertragbar ist.

Verteilung der Heizungsarten und Energieträger

Die Verteilung der Heizungsarten und Energieträger (**Tabelle 5-4**) ist für die Untersuchung von großer Bedeutung, da hierin Auskunft über die wesentlichen Verursacher des Energieverbrauchs und der Emissionen gegeben wird. Wie auch der Wohngebäude- und Wohnflächenbestand ist die Verteilung der Heizungsarten und der Energieträger statistisch nicht ausgewiesen, sondern muss aus der Gebäude- und Wohnungszählung 1987 mit der am Anfang des Kapitels 5.1 beschriebenen Methodik errechnet werden.

Tabelle 5-4: Verteilung der Heizungsarten und der Energieträger an den Baualtersklassen in Bayern im Jahr 2000

Gebäudetyp	Gebäudebaujahr	Fernwärme	Erdgas		Heizöl		Strom	Kohle / Holz		zusätzl. beheizt mit Solarenergie, Wärmepumpe
			Zentral-Hzg.	Einzel-, Mehr- raum-Ofenhzg.	Zentral-Hzg.	Einzel-, Mehr- raum-Ofenhzg.		Block-, Zentral- Hzg.	Einzel-, Mehr- raum-Ofenhzg.	
EFH	bis 1918	0,7%	7,2%	4,9%	20,8%	13,3%	11,8%	5,8%	35,6%	0,6%
	1919 - 1948	0,8%	13,1%	4,9%	33,6%	13,3%	12,0%	2,7%	19,7%	0,7%
	1949 - 1968	1,1%	10,8%	3,0%	52,6%	10,0%	9,2%	2,5%	10,8%	1,2%
	1969 - 1978	1,6%	12,5%	0,2%	79,1%	0,7%	4,5%	0,7%	0,8%	2,0%
	1979 - 1983	1,3%	23,0%	0,2%	68,4%	0,4%	5,1%	0,8%	0,6%	4,8%
	1984 - 1987	0,8%	24,3%	1,0%	60,2%	2,2%	5,1%	3,4%	3,0%	6,1%
	1988-1994	5,2%	43,0%	0,5%	40,2%	1,0%	4,9%	2,7%	2,5%	1,1%
	Neubau	5,2%	43,3%	0,4%	40,4%	0,8%	4,9%	2,6%	2,5%	1,1%
	Gesamt	2,0%	19,6%	2,0%	51,2%	5,7%	7,4%	2,5%	9,6%	1,8%
ZFH	bis 1918	0,8%	11,4%	5,1%	29,1%	14,9%	11,8%	4,7%	22,2%	0,9%
	1919 - 1948	0,8%	14,5%	4,7%	39,3%	13,5%	11,2%	2,3%	13,8%	0,9%
	1949 - 1968	0,8%	10,0%	2,7%	55,6%	11,3%	9,3%	1,9%	8,4%	1,4%
	1969 - 1978	0,9%	8,0%	0,2%	83,4%	1,1%	4,7%	0,8%	0,9%	2,0%
	1979 - 1983	1,0%	19,4%	0,1%	72,3%	0,3%	6,0%	0,6%	0,3%	5,9%
	1984 - 1987	0,6%	24,5%	0,7%	62,4%	1,5%	5,1%	3,5%	1,8%	6,8%
	1988-1994	5,3%	42,7%	0,6%	40,0%	1,2%	5,0%	2,7%	2,5%	1,1%
	Neubau	5,1%	43,4%	0,4%	40,4%	0,8%	4,9%	2,6%	2,5%	1,1%
	Gesamt	1,6%	17,6%	2,1%	53,8%	7,3%	7,9%	2,2%	7,5%	1,8%
MFH	bis 1918	2,9%	21,4%	15,8%	20,6%	14,8%	12,3%	0,8%	11,5%	0,3%
	1919 - 1948	4,2%	23,1%	15,2%	21,9%	12,1%	13,1%	0,6%	9,8%	0,2%
	1949 - 1968	10,5%	18,9%	8,8%	39,4%	9,4%	7,5%	0,3%	5,3%	0,2%
	1969 - 1978	15,2%	20,4%	0,0%	60,8%	0,0%	3,6%	0,0%	0,0%	0,3%
	1979 - 1983	12,5%	42,8%	0,0%	41,8%	0,0%	2,9%	0,0%	0,0%	1,4%
	1984 - 1987	15,4%	49,6%	0,6%	31,2%	0,4%	2,3%	0,2%	0,3%	0,9%
	1988-1994	5,2%	43,1%	0,5%	40,2%	0,9%	4,9%	2,7%	2,5%	1,1%
	Neubau	5,0%	43,7%	0,3%	40,6%	0,5%	4,9%	2,5%	2,4%	1,1%
	Gesamt	9,2%	27,6%	5,7%	40,2%	5,6%	6,7%	0,8%	4,2%	0,5%

Mehr als 70 % aller EFH und ZFH sind zentral beheizt. So werden sogar mehr als 50 % mit einer Heizöl-Zentralheizung und etwa 20 % mit Erdgas-Zentralheizungen versorgt. Die restlichen Gebäude werden jeweils zwischen 7 und 10 % durch dezentrale Kohle- oder Holzöfen oder mit Strom beheizt. Alle anderen Beheizungsarten weisen Anteile zwischen 1,5 und 2,5 % auf.

Etwas anders verhält es sich bei den Mehrfamilienhäusern. Hier werden etwa 40 % mit Heizölzentralheizungen und etwa 30 % mit Erdgaszentralheizungen versorgt. Aufgrund der des höheren Anteils in Städten beträgt der Anteil der mit Fernwärme versorgten Gebäude 9,2 %, gefolgt von elektrisch beheizten mit 7 % und dezentralen Erdgas- oder Heizölheizungen mit je etwa 6 %. Etwas niedriger liegen noch die dezentralen Kohle- oder Holz-Einzelöfen. Die übrigen beiden Heizungsarten weisen Anteil unter 1 % auf.

Allen drei Gebäudetypen gemeinsam ist der Anteil der mit Heizöl oder Erdgas befeuerten Zentralheizungsanlagen in Höhe von etwa 70 %; die daher für die Anwendung von Maßnahmen zur Reduzierung von Energiebedarf und CO₂-Emissionen ausgewählt werden. Ein weiterer Grund hierfür liegt darin begründet, dass in einer Zentralheizungsanlage relativ einfach Modernisierungsmaßnahmen durchgeführt werden können, ohne dass hierfür das gesamte Gebäude betroffen ist.

Für die Untersuchung ist es erforderlich, nicht nur die Anzahl der Wohneinheiten und die Wohnflächen für die einzelnen Gebäudetypen, die einzelnen Baujahre und die jeweiligen Beheizungsarten zu kennen, sondern auch die jeweilige mittlere Personenbelegung, den Jahresstrombedarf pro Haushalt und das jeweilige Kesselbaujahr der Heizungsanlage.

5.2 Personenbelegung pro Quadratmeter Wohnfläche

Die mittlere Personenbelegung pro Quadratmeter Wohnfläche ist für Bayern nicht gesondert ausgewiesen. Deshalb werden Angaben aus [33] herangezogen, die auf Zahlen der 1 %-Gebäude- und Wohnungsstichprobe des Statistischen Bundesamtes Wiesbaden aus dem Jahr 1993 basieren. Es werden hier nicht nur die Gebäudetypen unterschieden, sondern es kann auch eine Unterscheidung nach den Baualtersklassen durchgeführt werden.

Bei der Hochrechnung der Bevölkerungszahl von Bayern aus den Wohnflächen und der mittleren Personenbelegung pro Quadratmeter Wohnfläche wird deutlich, dass die Bevölkerungszahl um etwas mehr als 5,5 % über der tatsächlichen liegt.

Aus diesem Grund wird ein Korrekturfaktor für die mittlere Personenbelegung pro Quadratmeter Wohnfläche eingeführt. Er beträgt einheitlich für alle Gebäudetypen und Baualtersklassen 1,03. Durch diesen Korrekturfaktor erfüllt die Hochrechnung die Realität zu 100,2 %, was innerhalb der Genauigkeit der gesamten Berechnung liegt.

Für die EFH ergibt sich hieraus eine mittlere Wohnfläche von 43,8 m², für ZFH von 39,4 m² und für MFH bzw. Sonstige von 36,0 m² pro Person, die einzelnen, nach den Baualtersklassen aufgegliederten Werte sind im Anhang unter Kapitel 13.4 aufgeführt.

5.3 Ermittlung des Jahresstrombedarfs

Der mittlere Jahresstrombedarf pro Haushalt errechnet sich aus Angaben des Haushaltsmodells [5], in dem die Sättigung mit den einzelnen Geräten, der zugehörige jährliche Stromverbrauch pro Gerät und die Anzahl der Personen pro Haushalt Eingang findet. Die Umlegung dieser Angaben aus dem Haushaltsmodell auf die Typgebäude erfolgt in dieser Untersuchung mit Hilfe einer Regressionsfunktion aus den Haushaltsmodelldaten mit der Personenbelegung als Parameter (**Tabelle 5-5**). Aufgrund der Mittelung über alle Haushalte werden die Zuschläge bei Haushalten in EFH gegenüber Haushalten in MFH ausgeglichen.

Tabelle 5-5: Jahresstromverbrauch in Abhängigkeit von der Personenzahl im Haushalt

Personen im Haushalt Anzahl	Jahresstrom- verbrauch kWh/a
1	1.272
2	1.890
3	2.582
4	3.348
5	4.189

5.4 Ermittlung des Kesselbaujahres

Die Altersstruktur der in den einzelnen Gebäuden installierten Zentralheizungskessel wird mit Hilfe einer Sonderauswertung aus den Ursprungsdaten aus [6] gewonnen. Hierzu werden die Baualter der Heizungskessel der über 2.000 in dieser Studie untersuchten Objekte nach den Kriterien Gebäudegröße und Altersklasse der Typgebäude sortiert und ausgewertet. Anschließend werden Ausreißer bereinigt und ein Quervergleich mit Angaben aus [34] vorgenommen, wobei angenommen wird, dass die in dieser Quelle angegebene Alterstruktur für den real existierenden Gebäudemix auf reine Wohngebäude vollständig übertragbar ist. Das Ergebnis dieser Berechnung ist in **Tabelle 5-6** aufgeführt.

Eine scharfe Trennung zwischen den einzelnen Baualterklassen ist nur rechnerisch möglich, in der Realität gibt es diese Trennung nicht, da zum Beispiel die Verbesserung der Kessel nicht abrupt, sondern konstant erfolgt. So weisen Kessel des Baujahres 1994 keine wesentlich schlechteren Nutzungsgrade auf als Kessel von 1995, die Mittelwerte der Nutzungsgrade innerhalb der Baualterklassen hingegen unterscheiden sich zum Teil deutlich.

Die Anzahl der mit Erdgas und Heizöl befeuerten Heizungsanlagen in den einzelnen Kesselbaualterklassen werden für den jeweiligen Energieträger (Erdgas oder Heizöl), den jeweiligen Gebäudetyp (EFH, ZFH, MFH) und die jeweilige Gebäudebaualterklasse auf die jeweiligen Zahlenwerte der Wohngebäudestruktur wie folgt berechnet:

Formel 5-2: Berechnung der Heizkessel- Bestandszahlen

$$A_{\text{Kessel}} = A_{\text{Gebäude}} * a_{\text{HA,ET}} * a_{\text{kBAK}} / A_{\text{Whg}} \quad \text{für ET, Gebtyp, GBAK}$$

mit: A_{Kessel} = Anzahl der vorhandenen Kessel in dieser Klasse [Stück]
 $A_{\text{Gebäude}}$ = Anzahl der Gebäude (aus Tabelle 5-3) [Stück]
 $a_{\text{HA,ET}}$ = Anteil der Heizungsarten und Energieträger an den Baualterklassen (Tabelle 5-4) [%]
 a_{KBAK} = Anteil der Kesselbaualterklasse (aus Tabelle 5-6) [%]
 A_{Whg} = Anzahl der Wohnungen pro Gebäude in dieser Klasse (aus [33]) [Stück]
ET = Energieträger (Erdgas oder Heizöl)
Gebtyp = Gebäudetyp (EFH, ZFH, MFH)
GBAK = Gebäudebaualterklassen

Tabelle 5-6: Altersstruktur der Zentralheizungskessel in Bayern im Jahr 2000

Gebäude- baujahr		Kesselbaujahr									
		mit Erdgas beheizt					mit Heizöl beheizt				
		bis 1978	1979 bis 1983	1984 bis 1987	1988 bis 1994	1995 bis 2000	bis 1978	1979 bis 1983	1984 bis 1987	1988 bis 1994	1995 bis 2000
EFH	vor 1918	29%	10%	12%	20%	29%	15%	24%	23%	15%	23%
	1918 - 1948	12%	17%	12%	36%	23%	29%	9%	9%	35%	18%
	1949 - 1968	17%	16%	9%	38%	20%	28%	10%	10%	30%	22%
	1969 - 1978	27%	5%	7%	43%	18%	35%	18%	10%	26%	11%
	1979 - 1983	7%	51%	4%	19%	19%	6%	52%	7%	15%	20%
	1984 - 1987	0%	8%	55%	29%	8%	0%	9%	50%	27%	14%
	1988-1994	0%	0%	7%	85%	8%	0%	0%	4%	90%	6%
	Neubau	0%	0%	0%	9%	91%	0%	0%	0%	9%	91%
ZFH	vor 1918	17%	17%	15%	30%	21%	25%	19%	14%	28%	14%
	1918 - 1948	11%	17%	22%	44%	6%	18%	9%	9%	45%	18%
	1949 - 1968	15%	10%	14%	50%	11%	35%	16%	6%	30%	13%
	1969 - 1978	25%	8%	6%	49%	11%	40%	7%	10%	28%	15%
	1979 - 1983	2%	40%	4%	15%	40%	2%	49%	6%	18%	25%
	1984 - 1987	0%	13%	67%	17%	4%	0%	7%	73%	16%	4%
	1988-1994	0%	0%	7%	91%	2%	0%	0%	4%	89%	7%
	Neubau	0%	0%	0%	7%	93%	0%	0%	0%	7%	93%
MFH	vor 1918	22%	27%	10%	29%	12%	20%	20%	15%	32%	13%
	1918 - 1948	27%	15%	10%	32%	16%	37%	10%	11%	30%	12%
	1949 - 1968	12%	19%	12%	30%	27%	22%	16%	13%	31%	18%
	1969 - 1978	32%	7%	7%	38%	16%	40%	6%	6%	30%	18%
	1979 - 1983	0%	57%	14%	10%	19%	3%	41%	5%	45%	6%
	1984 - 1987	0%	0%	83%	11%	6%	0%	0%	50%	36%	14%
	1988-1994	0%	0%	4%	83%	13%	0%	0%	2%	89%	9%
	Neubau	0%	0%	0%	5%	95%	0%	0%	0%	5%	95%

Als Ergebnis dieser Berechnungen erhält man die in den **Tabelle 5-7** bis **Tabelle 5-10** angeführten Ergebnisse.

Tabelle 5-7: Anzahl der Erdgas- bzw. Heizöl-Zentralheizungsanlagen in den Kesselbaualterklassen im EFH in Bayern im Jahr 2000

		Kesselbaualter									
		Baujahre bis 1978		Baujahre 1979-1983		Baujahre 1984-1987		Baujahre 1988-1994		Baujahre 1995-2000	
		Gas	Heizöl	Gas	Heizöl	Gas	Heizöl	Gas	Heizöl	Gas	Heizöl
		Anzahl		Anzahl		Anzahl		Anzahl		Anzahl	
EFH	bis 1918	4.361	6.521	1.504	10.434	1.805	9.999	3.008	6.521	4.361	9.999
	1919 - 1948	2.283	14.167	3.235	4.397	2.283	4.397	6.850	17.098	4.376	8.793
	1949 - 1968	7.519	60.526	7.076	21.616	3.980	21.616	16.806	64.849	8.845	47.556
	1969 - 1978	10.555	86.795	1.955	44.638	2.736	24.799	16.809	64.476	7.036	27.278
	1979 - 1983	2.573	6.558	18.747	56.833	1.470	7.651	6.984	16.394	6.984	21.859
	1984 - 1987	0	0	1.646	4.594	11.317	25.520	5.967	13.781	1.646	7.146
	1988-1994	0	0	0	0	5.678	3.035	68.951	68.289	6.489	4.553
	1995-2000	0	0	0	0	0	0	6.791	6.329	68.665	63.994
	Summe	27.291	174.567	34.163	142.511	29.270	97.016	132.166	257.738	108.404	191.178
Anteil	13,5%	86,5%	19,3%	80,7%	23,2%	76,8%	33,9%	66,1%	36,2%	63,8%	
Zusammen	201.858		176.674		126.286		389.904		299.582		
Gesamtsumme		1.194.304									

Tabelle 5-8: Anzahl der Erdgas- bzw. Heizöl-Zentralheizungsanlagen in den Kesselbaualterklassen im ZFH in Bayern im Jahr 2000

		Kesselbaualter									
		Baujahre bis 1978		Baujahre 1979-1983		Baujahre 1984-1987		Baujahre 1988-1994		Baujahre 1995-2000	
		Gas	Heizöl	Gas	Heizöl	Gas	Heizöl	Gas	Heizöl	Gas	Heizöl
		Anzahl		Anzahl		Anzahl		Anzahl		Anzahl	
ZFH	bis 1918	1.227	4.628	1.227	3.517	1.082	2.592	2.165	5.183	1.515	2.592
	1919 - 1948	973	4.312	1.460	2.156	1.946	2.156	3.893	10.781	487	4.312
	1949 - 1968	2.685	34.072	1.709	15.576	2.441	5.841	8.788	29.205	1.953	12.655
	1969 - 1978	1.809	29.848	565	5.223	452	7.462	3.505	20.893	792	11.193
	1979 - 1983	148	531	2.817	12.998	297	1.592	1.038	4.775	2.817	6.632
	1984 - 1987	0	0	548	746	2.924	8.201	731	1.789	183	447
	1988-1994	0	0	0	0	1.691	858	20.719	19.080	423	1.501
	1995-2000	0	0	0	0	0	0	1.448	1.349	19.243	17.922
	Summe	6.843	73.391	8.326	40.216	10.834	28.701	42.288	93.055	27.412	57.254
Anteil	8,5%	91,5%	17,2%	82,8%	27,4%	72,6%	31,2%	68,8%	32,4%	67,6%	
Zusammen	80.233		48.542		39.535		135.343		84.666		
Gesamtsumme		388.319									

Tabelle 5-9: Anzahl der Erdgas- bzw. Heizöl-Zentralheizungsanlagen in den Kesselbaualterklassen im MFH in Bayern im Jahr 2000

		Kesselbaualter									
		Baujahre bis 1978		Baujahre 1979-1983		Baujahre 1984-1987		Baujahre 1988-1994		Baujahre 1995-2000	
		Gas	Heizöl	Gas	Heizöl	Gas	Heizöl	Gas	Heizöl	Gas	Heizöl
		Anzahl		Anzahl		Anzahl		Anzahl		Anzahl	
MFH	bis 1918	2.042	1.794	2.506	1.794	928	1.346	2.692	2.871	1.114	1.166
	1919 - 1948	2.278	2.957	1.266	799	844	879	2.700	2.398	1.350	959
	1949 - 1968	2.212	8.454	3.502	6.148	2.212	4.995	5.529	11.912	4.976	6.917
	1969 - 1978	3.787	14.084	828	2.113	828	2.113	4.497	10.563	1.893	6.338
	1979 - 1983	0	244	4.749	3.338	1.166	407	833	3.664	1.583	489
	1984 - 1987	0	0	0	0	6.702	4.222	737	1.520	402	591
	1988-1994	0	0	0	0	695	325	14.422	14.453	2.259	1.462
	1995-2000	0	0	0	0	0	0	912	846	17.322	16.065
	Summe	10.319	27.533	12.851	14.193	13.376	14.287	32.321	48.226	30.900	33.985
	Anteil	27,3%	72,7%	47,5%	52,5%	48,4%	51,6%	40,1%	59,9%	47,6%	52,4%
	Zusammen	37.852		27.044		27.662		80.547		64.885	
	Gesamtsumme	237.990									

In der folgenden **Tabelle 5-10** ist die Verteilung der mit Erdgas- und Heizöl befeuerten Zentralheizungsanlagen auf die Gebäudetypen und Gebäudebaujahre in der Zusammenfassung aufgezeigt. Man erkennt daraus, dass 42,1 % oder 765.686 Heizungsanlagen in Bayern älter als 15 Jahre sind. 17,6 % oder 319.942 Heizungsanlagen in Bayern sind bis einschließlich 1978, 13,9 % oder 252.259 Anlagen zwischen 1978 und 1983 und 10,6 % oder 193.484 Anlagen zwischen 1984 und 1987 gebaut worden. Zwischen 1988 und 1994 waren es 33,3 % oder 605.794 Anlagen, die restlichen 449.133 Anlagen oder 24,7 % wurden zwischen 1995 und 2000 installiert.

Tabelle 5-10: Anzahl der mit Erdgas und Heizöl befeuerten Heizungsanlagen in den einzelnen Kesselbaualterklassen in Bayern im Jahr 2000

	Kesselbaualter						Summe	Anteil
	Baujahre bis 1978	Baujahre 1979-1983	Baujahre 1984-1987	Baujahre 1988-1994	Baujahre 1995-2000			
	Anzahl							
EFH	201.858	176.674	126.286	389.904	299.582	1.194.304	66%	
ZFH	80.233	48.542	39.535	135.343	84.666	388.319	21%	
MFH	37.852	27.044	27.662	80.547	64.885	237.990	13%	
Summe	319.942	252.259	193.484	605.794	449.133	1.820.612	100%	
Anteil	17,6%	13,9%	10,6%	33,3%	24,7%	100,0%	.	

5.5 Bildung von Typgebäuden

Mit all diesen Zahlen werden nun zur weiteren Berechnung Typgebäude gebildet, mit denen ein Modell der bayerischen Haushalte erstellt werden kann, das die Berechnung von Maßnahmen zur Minderung von Primärenergieverbrauch und treibhauswirksamen Emissionen ermöglicht.

Dieser Schritt ist notwendig, da hierdurch die einzelnen Flächen an den Gebäuden (Außenwand, Fenster, Dach), die zugehörigen U-Werte, der Heiz- und Brauchwasser-Wärmebedarf und weitere Parameter wie Personenbelegung oder Strombedarf auf die einzelnen Gebäudetypen und Baualterklassen angewandt werden. Diese Typgebäude dienen als Basis für die Potentialabschätzung, in der dann die vorgeschlagenen Maßnahmen mit den Daten der Typgebäude berechnet werden.

Die Bildung der Typgebäude erfolgt in Anlehnung an [3], in der auch die wärmetechnische Ertüchtigung einzelner Gebäude berücksichtigt wird, in dem ein Mixgebäude aus den ungedämmten und den wärmetechnisch verbesserten Gebäuden gebildet wird, das zwar in der Realität nicht gebaut werden kann, aber den statistischen Mittelwerten entspricht.

Als klimatische Voraussetzungen werden die auf Würzburg bezogenen Daten aus [3] übernommen. Würzburg spiegelt die mittleren klimatischen Verhältnisse und die Gebäudebauweise hinsichtlich der wärmetechnischen Standards der alten Bundesländer unter Berücksichtigung der Bevölkerungsdichte wider. Eine direkte Übertragung dieser Werte ist nach [35] aufgrund folgender Fakten möglich:

- Das Verhältnis der Gradtagszahlen von Bayern gegenüber der Gradtagszahlen der Alten Bundesländer beträgt 1,09.
- Bei den Ein- und Zweifamilienhäusern herrscht in Bayern ein verbesserter wärmetechnischer Standard vor und führt zu einem Reduktionsfaktor des Heizwärmebedarfs von 0,87 gegenüber dem Bundesdurchschnitt.
- Der aus den beiden Faktoren resultierende Wert von $1,09 * 0,87 = 0,95$ müsste theoretisch auf die Jahresheizwärmebedarfswerte angewendet werden, doch nehmen weitere Faktoren wie die geringere Kompaktheit der Gebäude in Bayern Einfluss auf diesen Wert, so dass insgesamt ein Reduktionsfaktor für Bayern gegenüber den Alten Bundesländern zwischen 0,95 und 1,00 anzusetzen ist.

Für diese Untersuchung wird der Faktor 1,00 gewählt, da durch die Unsicherheit bei der Berechnung die Fehler bei den Wärmebedarfswerten nicht ins Gewicht fallen.

Die Typgebäude werden in acht **Baualterklassen** unterschieden, deren Grenzen durch die angegebenen Stichwörter in die Vergangenheit eingeordnet werden können:

- bis 1918 Gründung der Weimarer Republik
- 1919 - 1948 Weimarer Republik bis zur Gründung der BRD
- 1949 - 1968 Nachkriegszeit, Wirtschaftswunder
- 1969 - 1978 Ergänzung der DIN 4108
- 1979 - 1983 Wirksamwerden der 1. WSV0
- 1984 - 1987 Wirksamwerden der 2. WSV0 bis zur Wohnungszählung 1987
- 1988 - 1994 Nach der Wohnungszählung
- Neubau WSchV 95 wird wirksam.

Die Altersklasse 1949 – 1968 ist eine Zusammenfassung der in [3] angeführten Altersklassen 1949 - 1956 und 1957 – 1968, welche aufgrund der nur für den gesamten Zeitraum vorhanden statistischen Daten über den Wohngebäudebestand für Bayern erforderlich ist.

Eine weitere Unterteilung erfolgt für die drei, bereits genannten **Gebäudegrößen**:

- Einfamilienhäuser (EFH)
- Zweifamilienhäuser (ZFH) und
- Mehrfamilienhäuser (MFH)

Auf eine weitere Unterscheidung hinsichtlich der Gebäudelage (freistehend, Eck- oder Mittellage) oder einer weiteren Unterteilung der Mehrfamilienhäuser wird in dieser Untersuchung verzichtet, um die Anzahl der Typgebäude noch überschaubar zu halten.

Man erhält mit diesen Unterscheidungsmerkmalen somit 24 Typgebäude, für die jeweils einzeln definiert sind:

- die Abmessungen und wärmetechnischen Kenngrößen,
- die Personenbelegung pro Quadratmeter Wohnfläche und
- der mittlere Jahresstrombedarf.

Die Abmessungen der einzelnen Typgebäude werden in einem ersten Schritt aus [3] entnommen und über die aus der Wohngebäudestruktur stammenden Wohnflächen auf die Werte für Bayern angepasst.

In einem zweiten Schritt wird der Heizwärmebedarf über die U-Werte der Gebäudeteile mit dem vereinfachten Verfahren zur Ermittlung des Heizwärmebedarfes nach der EnEV (siehe Anhang, Kapitel 13.3) berechnet. Die hieraus resultierenden Werte für den spezifischen Heizwärmebedarf, die Heizwärmeleistung und die Heizungsvollaststunden werden auf Plausibilität und Übereinstimmung mit den Gebäuden aus [3] überprüft und gegebenenfalls iterativ über die U-Werte der Bauteile korrigiert.

Als Ergebnis dieser Berechnungen erhält man die im Anhang unter 13.9 aufgeführten Typgebäude. Diese so definierten Gebäude weichen von den in der Realität bestehenden Einzelgebäuden ab, doch werden diese Abweichungen durch die Abbildung der Mittelwerte für diesen Gebäudetyp und diese Baualtersklasse verursacht.

5.6 Struktur des Energieeinsatzes bei den bayerischen Haushalten 2000

Mit Hilfe der Typgebäude ist es nun möglich, über die Wohngebäudestruktur den Energieeinsatz und die Emissionen der bayerischen Haushalte 2000 mit nachfolgender Vorschrift zu errechnen:

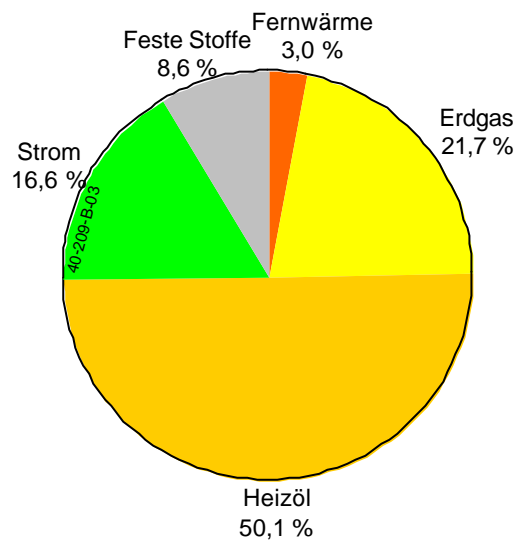
Hierzu werden die Daten der Typgebäude wie spezifischer Heizwärmebedarf, Warmwasserbedarf, usw. mit der Wohngebäudestruktur verknüpft. Mit der Bottom-up-Methode werden die daraus gewonnenen Einzelergebnisse für Energie- und Emissionswerte zu einem Gesamtergebnis zusammengefasst.

Energiebilanz der bayerischen Haushalte 2000

In **Tabelle 5-11** ist das Ergebnis für den Endenergieeinsatz der bayerischen Haushalte, aufgeteilt nach den eingesetzten Energieträgern und den untersuchten Gebäudearten dargestellt.

Tabelle 5-11: Aufteilung des Endenergieeinsatzes der bayerischen Haushalte im Jahr 2000

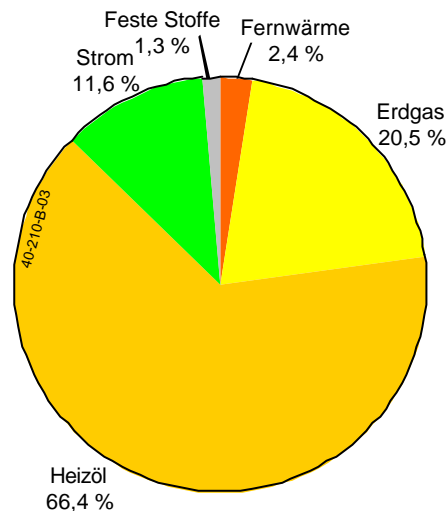
Alle Angaben in [TWh]	Fern- wärme	Erdgas	Heizöl	Strom	Feste Stoffe	Summe
Endenergieverbrauch	3,31	23,72	54,81	18,12	9,43	109,40
davon						
Heizung und Warmwasser in						
Wohngebäude	3,22	21,51	53,47	6,73	9,14	94,06
davon in						
EFH	0,64	8,60	26,97	3,01	5,97	45,19
ZFH	0,22	3,52	12,72	1,45	1,85	19,75
MFH	2,36	9,38	13,78	2,27	1,32	29,11
Nichtwohngebäude mit Wohnraum	0,09	0,58	1,35	0,18	0,29	2,49
davon in						
Wohngeb. m. 1 od. 2 Freizeit-WE	0,00	0,02	0,13	0,04	0,04	0,24
Wohnheime	0,01	0,03	0,03	0,00	0,00	0,08
Sonst. Gebäude mit Wohnraum	0,08	0,52	1,18	0,13	0,25	2,17
Sonstiger Verbrauch	0,00	1,64	0,00	11,21	0,00	12,85

**Bild 5-1: Energieträgermix der Bayerischen Haushalte im Jahr 2000****Emissionen im Jahr 2000**

Die aus dem Energieverbrauch resultierenden Emissionen betragen rund 26,4 Mio. Tonnen CO₂, die zu rund 89,1 % oder 23,5 Mio. Tonnen durch die Heizung und Warmwasserbereitung in Wohngebäuden, zu 2,3 % oder 0,6 Mio. Tonnen in Nicht-Wohngebäuden entstehen (Tabelle 5-12). Die übrigen 8,6 % bzw. 2,3 Mio. Tonnen CO₂ werden beim sonstigen Verbrauch, bedingt durch den überwiegenden Stromanteil, in den Kraftwerken freigesetzt.

Tabelle 5-12: Aufteilung der CO₂-Emissionen der bayerischen Haushalte im Jahr 2000

Alle Angaben in [Mio. t]	Fernwärme	Erdgas	Heizöl	Strom	Feste Stoffe	Summe
CO₂-Emissionen	0,63	5,41	16,95	3,05	0,33	26,37
davon						
Heizung und Warmwasser in						
Wohngebäude	0,61	4,91	16,54	1,13	0,32	23,51
davon in						
EFH	0,12	1,96	8,34	0,51	0,21	11,14
ZFH	0,04	0,80	3,93	0,24	0,07	5,09
MFH	0,45	2,14	4,26	0,38	0,05	7,28
Nichtwohngebäude mit Wohnraum	0,02	0,13	0,42	0,03	0,01	0,61
davon in						
Wohngeb. m. 1 od. 2 Freizeit-WE	0,00	0,01	0,04	0,01	0,00	0,05
Wohnheime	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,02
Sonst. Gebäude mit Wohnraum	0,02	0,12	0,37	0,02	0,01	0,53
Sonstiger Verbrauch	0,00	0,37	0,00	1,89	0,00	2,26

**Bild 5-2: Aufteilung der CO₂-Emissionen der Bayerischen Haushalte im Jahr 2000 auf die Energieträger**

Betrachtet man neben den CO₂-Emissionen zusätzlich noch Methan- und Lachgas-Emissionen, so kann hieraus das in **Tabelle 5-13** zusammengefasste Ergebnis für das CO₂-Äquivalent gewonnen werden.

Das gesamte CO₂-Äquivalent von 28,25 Mio. Tonnen wird durch Heizung und Warmwasserbereitung in Wohngebäuden zu rund 88 % und in Nichtwohngebäuden mit Wohnraum zu 2,3 % verursacht. Der sonstige Verbrauch besitzt einen Anteil von 9,8 % am CO₂-Äquivalent, der hauptsächlich durch die Emissionen bei der Strombereitstellung zurückzuführen ist.

Tabelle 5-13: Aufteilung der CO₂-Emissionen der bayerischen Haushalte im Jahr 2000

Alle Angaben in [Mio. t]	Fern- wärme	Erdgas	Heizöl	Strom	Feste Stoffe	Summe
CO₂-Emissionen	0,67	5,98	17,39	3,79	0,41	28,25
davon						
Heizung und Warmwasser in						
Wohngebäude	0,66	5,42	16,96	1,41	0,40	24,85
davon in						
EFH	0,13	2,17	8,56	0,63	0,26	11,75
ZFH	0,05	0,89	4,03	0,30	0,08	5,35
MFH	0,48	2,36	4,37	0,48	0,06	7,75
Nichtwohngebäude mit Wohnraum	0,02	0,15	0,43	0,04	0,01	0,64
davon in						
Wohngeb. m. 1 od. 2 Freizeit-WE	0,00	0,01	0,04	0,01	0,00	0,06
Wohnheime	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,02
Sonst. Gebäude mit Wohnraum	0,02	0,13	0,37	0,03	0,01	0,56
Sonstiger Verbrauch	0,00	0,41	0,00	2,35	0,00	2,76

Primär-, Endenergie- und Emissionsbilanz der Haushalte in Bayern 2000

Fasst man nun diese Werte zusammen und berechnet zusätzlich den Primärenergiebedarf bzw. das CO₂-Äquivalent der bayerischen Haushalte, so ergibt sich das in **Tabelle 5-14** dargestellte Ergebnis.

Tabelle 5-14: Energie- und Emissionsbilanz der Haushalte in Bayern für das Jahr 2000

	End- energie TWh	Primär- energie TWh	CO ₂ - Emissionen Mio. t	CO ₂ -Äqu- Emissionen Mio. t
Fernwärme	3,31	2,65	0,63	0,67
Gas	23,72	26,51	5,41	5,98
Heizöl	54,81	61,04	16,95	17,39
Strom	18,12	52,97	3,05	3,79
Feste Stoffe	9,43	9,88	0,33	0,41
Summe	109,40	153,04	26,37	28,25

Aus der Endenergie von rund 109,4 TWh resultiert ein Primärenergiebedarf von 153,0 TWh, den CO₂-Emissionen von knapp 26,4 Mio. Tonnen steht ein CO₂-Äquivalent von 28,3 Mio. Tonnen gegenüber. Der verminderte Primärenergiebedarf der Fernwärme gegenüber dem Endenergiebedarf ist mit der Nutzung von Abwärme aus der Stromerzeugung als aufwandfreies Nebenprodukt zu erklären. Diese Zahlenwerte bilden die Ausgangslage für die Potentialabschätzung, in der dieser Primärenergiebedarf und die CO₂-Emissionen durch verschiedene, auf die jeweiligen Gebäudetypen und Baualterklassen abgestimmte Maßnahmen reduziert werden sollen.

6 Vermeidungskosten der Einzelmaßnahmen im Haushaltsbereich

Im nächsten Schritt erfolgt die Umsetzung der in Kapitel 4 allgemein beschriebenen Maßnahmen auf die Strukturen im Haushaltsbereich.

Hierzu werden im Haushaltsbereich die einzelnen Maßnahmen für alle möglichen Kombinationen von Typgebäuden, Heizungsarten und Energieträgern berechnet und unter Verwendung des Bewertungsverfahrens die jeweils optimalen Maßnahmen selektiert. Als Ergebnis erhält man einen Maßnahmenkatalog, der nicht nur die jeweils optimalen Varianten aus dem in Kapitel 4 aufgezeigten Maßnahmenkatalog enthält, sondern auch die durch diese Maßnahmen mögliche absolute Einsparung, die zugehörigen Vermeidungskosten oder Amortisationsdauern.

Aus kosten- und ressourcenoptimierter Sichtweise stellen die Vermeidungskosten die wichtigsten Ergebnisse bei der Maßnahmenberechnung dar, da sie die Kosten mit der Einsparung verbinden und eine für den Anwender direkt vergleichbare Größe ausweisen. Exemplarisch für die Ergebnisse im Haushaltsbereich werden im Folgenden die Vermeidungskosten für die Zielgröße CO₂-Vermeidungskosten aufgezeigt, da die Potentialabschätzungen mit anderen Zielgrößen ähnliche spezifische Vermeidungskosten aufweisen, so dass hier auf die Einzeldarstellung verzichtet wird.

6.1 Primärenergie-Vermeidungskosten

Die Spannweite der einzelnen PE Vermeidungskosten ist aus dem folgenden **Bild 6-1** ersichtlich, in dem die spezifischen Vermeidungskosten für Primärenergie für die Zielgröße CO₂-Vermeidungskosten dargestellt ist. Für die Einschätzung der Kosten für den Anwender werden zusätzlich Fördermaßnahmen berücksichtigt, so dass aus den Bildern die Spannweite der spezifischen Kosten, ohne und mit Förderung sowie der Überschneidungsbereich der beiden abgelesen werden kann.

Man erkennt aus dem Bild, dass einige Maßnahmen, wie zum Beispiel das BHKW, nur geringe Spannweiten aufweisen. Einzelne Maßnahmen, wie der Niedertemperaturkessel oder die Wärmedämmung Fenster, weisen sehr große Spannweiten auf, deren gesamte Darstellung weit über die in der Abbildung gewählten Grenzen hinausgeht. Hierfür gibt es verschiedene Gründe, die im wesentlichen von der Maßnahmen selbst und dem Gebäude beeinflusst werden, an dem die Maßnahme durchgeführt werden soll. So erweisen sich beispielsweise Wärmedämmmaßnahmen an Gebäuden neueren Baudatums aufgrund bereits vorhandener Dämmungen und des geringeren Einspareffektes teurer als Maßnahmen an älteren Gebäuden ohne Wärmedämmung.

Weiterhin erkennbar sind verschiedene Maßnahmengruppen. So besteht die erste Gruppe aus Maßnahmen, welche eine Einsparung an Kosten bei gleichzeitiger PE-Einsparung über ihre gesamte Spannweite ermöglichen. In diesem Beispiel sind dies die Kompaktleuchtstofflampe und das Biogas-BHKW mit Förderung.

Die zweite Gruppe wird von Maßnahmen gebildet, deren Spannweite von einer Kosteneinsparung zu Mehrkosten reicht. Hier sind zu nennen die meisten Maßnahmen zum Ersatz von Kesselanlagen, aber auch die Dämmung von Wand und Dach.

Maßnahmen, welche über ihre gesamte Spannweite Mehrkosten gegenüber dem Ausgangszustand aufweisen, bilden die dritte Gruppe. Für das gewählte Beispiel sind dies das Biomasse-Heizwerk, der Hackschnitzelkessel, die Dämmung von Außenwand und Fenster und die Kollektoranlage.

Die Photovoltaikanlage bildet in diesem Beispiel die vierte Gruppe. Hier werden alle Maßnahmen zusammengefasst, bei denen entweder keine Primärenergie, kein CO₂ oder kein CO₂-Äquivalent eingespart wird. Die Photovoltaikanlage spart in diesem Falle zwar Primärenergie ein, aufgrund des sehr CO₂-armen bayerischen Strommixes kann sie keinen Beitrag zur Reduzierung dieser Emissionsart aufgrund ihrer herstellungsbedingten Emissionen leisten.

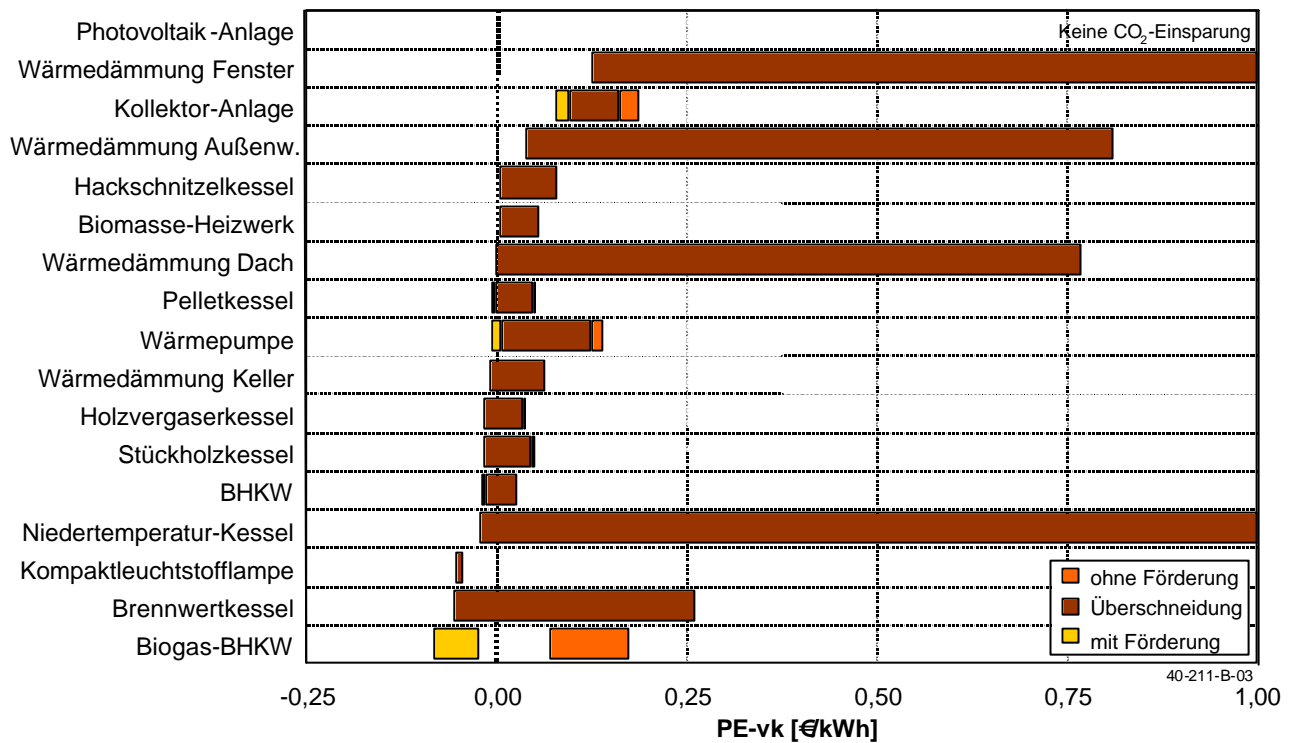


Bild 6-1: Spezifische PE-Vermeidungskosten über die gesamte Kette für die Potentialabschätzung mit der Zielgröße CO₂-k_v

6.2 CO₂-Vermeidungskosten

Stellt man nun die anstelle der PE-Vermeidungskosten die CO₂-Vermeidungskosten dar, so ergibt sich das folgende **Bild 6-2**.

Ähnlich wie in Bild 6-1 erkennt man unterschiedliche Spannweiten der einzelnen Maßnahmen, welche auf die gleichen Gründe zurückzuführen sind. Im Unterschied hierzu erkennt man aber eine andere Reihung der Maßnahmen.

So wird die erste Gruppe von der Kompaktleuchtstofflampe und dem Pelletkessel mit Förderung gebildet. Das Biogas-BHKW weist eine über den gesamten dargestellten Bereich reichende Spannweite auf und bildet mit den meisten Maßnahmen zum Ersatz von Kesselanlagen sowie der Wärmedämmung im Kellerbereich die zweite Gruppe.

Die dritte Gruppe umfasst die Maßnahmen zur Dämmung von Dach, Außenwand und Fenster sowie das Heizwerk, den Hackschnitzelkessel und die Kollektoranlage.

Die vierte Gruppe besteht aus den bereits angeführten Gründen wiederum aus der Photovoltaik-Anlage.

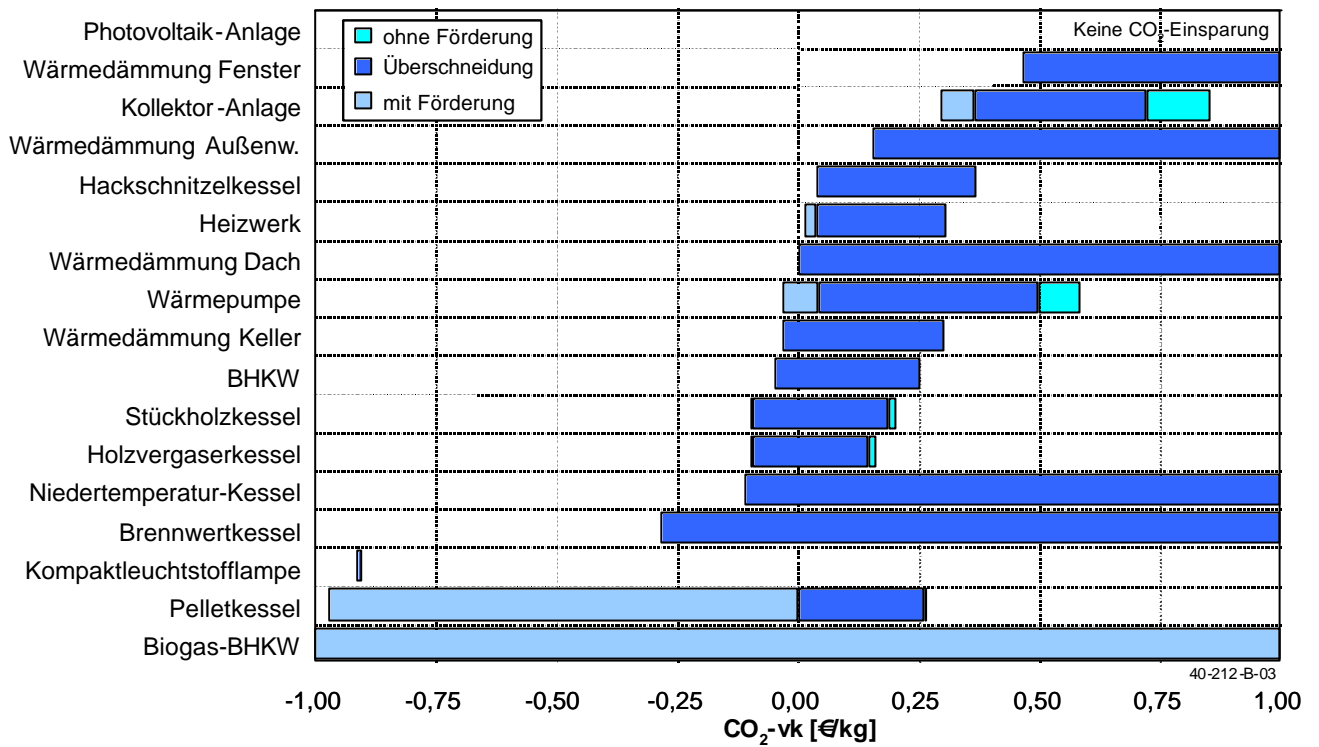


Bild 6-2: Spezifische CO₂-Vermeidungskosten über die gesamte Kette für die Potentialabschätzung mit der Zielgröße CO₂-k_v

7 Potentialabschätzung für den Haushaltsbereich

Die Hochrechnung der aus der Einzelberechnung gewonnenen Ergebnisse auf Gesamt-Bayern erfolgt unter Berücksichtigung von verschiedenen Randbedingungen, wie die Anteile der verschiedenen, innovativen Heizkessel am Gesamtkesselaustausch oder dem Anteil der auf EnEV-Standard zu dämmenden Gebäude.

Das Ergebnis der Hochrechnung ist dabei von dem gewählten Bewertungsansatz, d.h. von den Zielgrößen wie maximaler CO₂- oder PE-Minderung sowie minimalen CO₂- oder PE-Vermeidungskosten oder dem Mix aus unterschiedlichen Größen abhängig.

Für die Hochrechnung werden die Ergebnisse aus der Maßnahmenberechnung jeweils mit den Bestandszahlen aus Kapitel 5 und den Rahmenbedingungen aus Kapitel 7.1 multipliziert. Die Summe über alle Typgebäude und Varianten bildet schließlich die Gesamt-Potentialabschätzung.

7.1 Randbedingungen

Gebäudedämmung

Für die Ausweisung von Einsparpotentialen durch die Dämmung der Wohngebäude auf die durch die EnEV vorgeschriebenen maximalen Wärmedurchgangskoeffizienten wird angenommen, dass die Außenwände, Dächer und Kellerdecken aller Wohngebäude mit Erdgas- oder Heizöl befeuerten Zentralheizungsanlagen vollständig gedämmt und die Fenster aller Wohngebäude ausgetauscht werden. Dieser Wert wird in der Realität sicher nicht erreicht werden, doch zeigt er die maximal mögliche Einsparung an Emissionen und Primärenergie auf.

Austausch von Heizkesseln

Der Austausch von Heizungskesseln gliedert sich in drei nach dem Kesselbualter gegliederten Gruppen. Die erste Gruppe umfasst alle Kessel mit einem Baujahr bis 1978, deren Austausch nach den Vorschriften der EnEV in bestimmten Bereichen vorgeschrieben wird. Für diese Untersuchung wird angenommen, dass alle Kessel dieser Baualtersklasse ausgetauscht werden. Die zweite Gruppe wird von Kesseln mit Baujahren zwischen 1979 und 1983 gebildet, also Kessel kurz vor dem Erreichen ihrer technischen Lebensdauer, wenn das Jahr 2000 als Bezug herangezogen wird.

Die dritte Gruppe fasst die Kessel mit Baujahren zwischen 1984 und 1987 zusammen, die noch einige Jahre bis zum Erreichen ihrer technischen Lebensdauer in Gebrauch sind.

Der Ersatz der auszutauschenden Kessel erfolgt nach den in den folgenden Tabellen (**Tabelle 7-1** bis **Tabelle 7-3**) festgelegten Anteilen durch innovative Heizkessel wie dem Brennwertkessel, BHKWs oder biogen befeuerten Heizkesseln, wobei davon ausgegangen wird, dass alle in einer Sparte vorhandenen Heizkessel durch diesen Mix ersetzt werden.

Anteil der Zentralheizungsanlagen und Nahwärmekonzepte beim Kesseltausch

Die auszutauschenden Heizkessel in Ein- und Zweifamilienhäusern werden zu 90 % durch Zentralheizungsanlagen in den jeweiligen Gebäuden und nur zu 10 % durch Nahwärmekonzepte, die eine Versorgung von mehreren Gebäuden übernehmen, ersetzt (**Tabelle 7-1**). Aufgrund der größeren Dichte von Mehrfamilienhäusern in städtischen Bereichen wird der Anteil von mit einer Zentralheizung versorgten Gebäude auf 25 % und der durch Nahwärme dementsprechend auf 75 % gesetzt.

Tabelle 7-1: Anteil der Zentralheizungsanlagen und Nahwärmekonzepte beim Kesseltausch

	Anteil der Zentralheizungsanlagen	Anteil der Nahwärmekonzepte
EFH	90,0%	10,0%
ZFH	90,0%	10,0%
MFH	75,0%	25,0%

Aufteilung der Zentralheizungsanlagen beim Kesseltausch

Die Anteile der zur Auswahl stehenden Alternativen für den Austausch von Heizungskesseln können prinzipiell entweder über die Anteile der einzelnen Typen am momentanen bzw. auch zukünftigen Absatzmarkt oder aber auch über Szenarien festgelegt werden. Für diese Untersuchung wird die Festlegung über Szenarien verwendet, da hier nicht der zu erwartende Markt, sondern die Auswirkung hinsichtlich CO₂- und Primärenergieeinsparung untersucht werden soll.

Für die drei Gebäudetypen EFH, ZFH und MFH werden jeweils separate Szenarien angesetzt (**Tabelle 7-2**), bei denen aus Vereinfachungsgründen keine Unterscheidung nach der Baualtersklasse und dem eingesetzten Energieträger gemacht wird.

Tabelle 7-2: Anteile der jeweiligen Zentralheizungsanlagen beim Ersatz von Altkesseln

	WP	Pelletheizung	Stückholz	Holzvergaserkessel	Hackschnitzelkessel	NT	BWK	Biogas-BHKW
EFH	15,0%	7,0%	2,0%	2,0%	5,0%	35,0%	30,0%	4,0%
ZFH	15,0%	7,0%	2,0%	2,0%	5,0%	35,0%	30,0%	4,0%
MFH	10,0%	3,0%	2,0%	2,0%	2,0%	46,0%	35,0%	0,0%

Der Ersatz von älteren Kesselanlagen durch moderne wird erwartungsgemäß den größten Anteil ausmachen, zumal hier auch der Ersatz durch Brennwertkessel einbezogen wurde. Den nächstgrößeren Posten bilden die Wärmepumpen, die gerade in ländlichen Gebieten eine echte Alternative darstellen. Die restlichen Anteile teilen sich die biogen befeuerten Anlagen auf, wobei der Ersatz durch ein Biogas-BHKW aus Gründen der Anlagengröße nicht sinnvoll scheint.

Aufteilung der Nahwärmekonzepte beim Kesseltausch

Bei den Nahwärmekonzepten werden nur die Alternativen BHKW und Heizwerk für die Betrachtung herangezogen. Für alle drei Gebäudegrößen wird davon ausgegangen, dass bei Umstellung auf eine zentrale Beheizung 30 % aller Gebäude über Heizwerke und 70 % über Blockheizkraftwerke beheizt werden.

Tabelle 7-3: Anteile der Nahwärmekonzepte beim Ersatz von Altkesseln

	Heizwerk	BHKW
EFH	30,0%	70,0%
ZFH	30,0%	70,0%
MFH	30,0%	70,0%

Solarenergienutzung

Die Nutzung von Solarenergie zur Minderung von CO₂-Emissionen und Primärenergiebedarf wird in dieser Untersuchung anhand der zwei Beispielmaßnahmen Kollektoranlage und Photovoltaikanlage aufgezeigt. Es wird angenommen, dass jeweils 20 % der Dächer der Ein- und Zweifamilienhäuser für die Installation einer Kollektor- bzw. PV-Anlage geeignet sind. Bei den Dächern der Mehrfamilienhäuser werden jeweils 25 % angesetzt, da durch die in der Regel größere Gebäudehöhe eine geringere Verschattung der Dachflächen auftritt.

Die gleichzeitige Installation einer Kollektoranlage neben einer PV-Anlage schließt sich in der Untersuchung grundsätzlich nicht aus, wird aber in der Realität nur selten vorkommen.

Tabelle 7-4: Geeignete Dachflächen für die Nutzung von Solarenergie

	Kollektor- oder PV-Anlage
EFH	20%
ZFH	20%
MFH	25%

Strombezugsminderung durch KLL

Bei der Strombezugsminderung durch Kompaktleuchtstofflampen wird nach [5] im Jahr 2000 zur Beleuchtung eine installierte flächenspezifische elektrische Leistung von 15 W pro m² Wohnfläche angesetzt. Die Ausnutzungsdauer im Mittel über alle Lampen beträgt hierbei etwa 500 h pro Jahr.

Für die Untersuchung wird angenommen, dass nur etwa 25 % der installierten elektrischen Leistung an Glühlampen durch Kompaktleuchtstofflampen ausgetauscht werden können. Höhere Austauschraten sind aus verschiedensten Gründen wie Ästhetik, Lichtfarbe, Benutzungsdauer, Leuchtenform oder bereits installierten Leuchtstoff- oder Kompaktleuchtstofflampen nicht zu erwarten.

7.2 Potentialabschätzung für die einzelnen Maßnahmengruppen

Nach der Festlegung der Randbedingungen (siehe Kapitel 7.1) erfolgt nun die Abschätzung der Minderungspotentiale bei Energie und Emissionen für Bayern für die einzelnen Maßnahmen. In Anhängigkeit von den zur Auswahl von Maßnahmen aus möglichen Ausführungsalternativen gewählten Bewertungskriterien ergeben sich unterschiedliche Potentiale, wenn mehrere Ausführungsvarianten als Alternativen zur Verfügung stehen.

Für die Abschätzung der Potentiale werden beispielhaft die folgenden Zielgrößen-Varianten verwendet:

- Maximale Primärenergieeinsparung (Zielgröße PE)
- Maximale Kohlendioxid-Einsparung (Zielgröße CO₂)
- Minimale Primärenergie-Vermeidungskosten (Zielgröße PE-k_v)
- Minimale Kohlendioxid-Vermeidungskosten (Zielgröße CO₂-k_v)

7.2.1 Wärmedämmung

Die Potentialabschätzung für die Wärmedämmung zeigt auf, welche Energie- und Emissionsmengen unter den gegebenen Randbedingungen eingespart werden können und welche monetären Aufwänden hierzu notwendig sind.

Zur Errechnung des Potentials werden zuerst die Daten der einzelnen Typgebäude in die Kenngrößen der verschiedenen Maßnahmen zur Wärmedämmung eingesetzt, bevor die Maßnahmen berechnet und mit Hilfe des Bewertungsverfahrens die unter den getroffenen Annahmen optimale Maßnahme selektiert wird. Hierbei stehen nicht nur Alternativen der Maßnahmenausführung, sondern auch Ausführungsvariationen wie Dicke der Dämmschicht oder U-Wert des Glases zur Auswahl.

Durch Multiplikation mit den absoluten, nach den Kesselbaualter gegliederten Bestandzahlen aus Tabelle 5-7 bis Tabelle 5-9 und anschließender Summation der Einzelwerte wird die Potentialabschätzung ermittelt.

Für die gewählten Bewertungskriterien ergeben sich die in **Tabelle 7-5** dargestellten Potentiale.

Tabelle 7-5: Potentialabschätzung für Wärmedämmung

Zielgröße	PE-Einsparung		CO ₂ -Einsparung		CO ₂ Äqu-Einsparung		Kosten Mrd. €/a	Investitionen Mrd. €
	absolut TWh/a	relativ -	absolut Mio. t/a	relativ -	absolut Mio. t/a	relativ -		
PE	36,0	23,5%	9,8	37,3%	10,3	36,4%	5,38	97,9
CO ₂	35,7	23,3%	9,9	37,5%	10,3	36,6%	4,56	85,5
PE-k _v	33,0	21,5%	9,1	34,6%	9,5	33,8%	3,97	75,1
CO ₂ -k _v	32,8	21,4%	8,9	33,9%	9,3	33,1%	3,52	67,9

Demnach kann mit dem Kriterium maximale PE-Menge eine Minderung des Primärenergiebedarfs um 36 TWh oder 23,5 % erreicht werden, wofür jährlich 5,4 Mrd. € aufgewendet werden müssen. Verbunden ist diese Minderung mit einer Einsparung von 9,8 Mio. t CO₂ bzw. 10,3 Mio. t CO₂Äqu pro Jahr; gegenüber der Ausgangssituation bedeutet dies für CO₂ eine Einsparung von 37,3 % bzw. für das CO₂-Äquivalent um 36,4 %.

Beim Potential mit der Zielgröße CO₂ können mit jährlichen Kosten von 4,6 Mrd. € 9,9 Mio. t CO₂ bzw. 10,3 Mio. t CO₂Äqu die größten Mengen an Emissionen eingespart werden, welche um 37,5 % bzw. 36,6 % gegenüber der Ausgangslage reduziert werden.

Mit nur 21,5 % bzw. 33,0 TWh PE-Minderung weist das Potential mit der Zielgröße PE-k_v zwar eine deutlich geringere Einsparung an Primärenergie auf, doch werden hierfür auch nur 3,97 Mrd. € pro Jahr benötigt.

Die geringsten jährlichen Kosten werden durch das Potential mit der Zielgröße CO₂-k_v mit nur 3,5 Mrd. € verursacht; gleichzeitig werden hier aber 8,9 Mio. Tonnen CO₂ und 9,3 Mio. Tonnen CO₂Äqu eingespart.

Zur Verdeutlichung der Unterschiede der Potentialabschätzungen dient **Tabelle 7-6**, in der die Werte der einzelnen Sparten jeweils auf den Maximalwert dieser Sparte bezogen werden und somit die Relationen der Szenarien untereinander angeben.

Tabelle 7-6: Quervergleich der Potentialabschätzung für Wärmedämmung

Zielgröße	PE- Einsparung	CO ₂ - Einsparung	CO ₂ Äqu- Einsparung	Kosten	Investi- tionen
PE	100,0%	99,5%	99,6%	100,0%	100,0%
CO ₂	99,3%	100,0%	100,0%	84,9%	87,4%
PE-k _v	91,7%	92,3%	92,3%	73,9%	76,7%
CO ₂ -k _v	91,2%	90,5%	90,4%	65,4%	69,4%

Man erkennt daraus, dass bei den ersten beiden Potentialabschätzungen die Unterschiede in den Einsparungen an Primärenergie und Emissionen etwa im 1 %-Bereich liegen, die Kosten jedoch bereits um 15 % differieren.

Die beiden Potentialabschätzungen mit minimalen Vermeidungskosten weisen Unterschiede von bis zu 10 % bei den Einsparungen auf, jedoch werden auch zwischen 25 und 35 % weniger jährliche Kosten verursacht.

7.2.2 Austausch der Heizkessel

Der Austausch der Heizkessel erfolgt entsprechend Kapitel 7.1 in drei Stufen, für die jeweils auch das entsprechende Potential ausgewiesen werden kann. Im Gegensatz zu den anderen Maßnahmengruppen wird hier aufgrund von nur unwesentlichen Unterschieden bei möglichen Alternativen nur jeweils eine Variante eines neuen Heizkessels berechnet. Deshalb ergeben sich bei den verschiedenen Zielgrößen keine Unterschiede, weil das Bewertungsverfahren (siehe Kapitel 4.4) zum Beispiel innerhalb der Maßnahme Pelletkessel nicht zwischen Alternativen auswählen kann, da aufgrund der Randbedingungen der Anteil der Pelletkessel am Gesamtaustausch aller Heizkessel vorgegeben ist und kein zweiter Pelletkessel als Alternative zur Verfügung steht. Aus diesem Grund wird für diese Potentialabschätzung keine Zielgröße angegeben.

Der Ersatz der in Tabelle 5-7 bis Tabelle 5-9 angegebenen Kessel erfolgt in den drei genannten Stufen, indem die Daten der Typgebäude in die Maßnahmenblätter eingesetzt werden und die so erhaltenen Werte mit dem in Tabelle 7-1 bis Tabelle 7-3 angegebenen Neuanlagen-Mix zum Potential hochgerechnet werden. Die Ergebnisse der Potentialabschätzungen für alle drei Stufen sind in **Tabelle 7-7** aufgeführt.

Der Austausch der Heizkessel bis einschließlich Baujahr 1978 vermindert mit den festgelegten Randbedingungen den Primärenergiebedarf jährlich um 5,7 TWh bzw. 3,7 %. Gleichzeitig werden 1,3 Mio. Tonnen CO₂ bzw. CO₂Äqu eingespart, was einer Minderung um 5,1 % bzw. 4,6 % gleichkommt. An Investitionen müssen hierfür 3,3 Mrd. € getätigt werden, was jährliche Kosten in Höhe von 0,34 Mrd. € nach sich zieht.

Tauscht man nun auch noch die Heizkessel mit Baujahren zwischen 1979 und 1983 aus, so können zusätzlich 3,9 TWh Primärenergie und 0,9 Mio. Tonnen CO₂ bzw. CO₂Äqu eingespart werden. Dies entspricht einer Minderung von 2,5 % für Primärenergie, 3,4 % für Kohlendioxid und 3,1 % für das

CO₂-Äquivalent. Gegenüber der ersten Stufe müssen zusätzlich 2,5 Mrd. € investiert und jährlich 0,27 Mio. € bezahlt werden.

Tabelle 7-7: Potentialabschätzung für Heizkesselaustausch

Baujahr	PE-Einsparung		CO ₂ -Einsparung		CO ₂ Äqu-Einsparung		Kosten Mrd. €/a	Investitionen Mrd. €
	absolut TWh/a	relativ -	absolut Mio. t/a	relativ -	absolut Mio. t/a	relativ -		
bis 1978	5,7	3,7%	1,3	5,1%	1,3	4,6%	0,34	3,3
1979-1983	3,9	2,5%	0,9	3,4%	0,9	3,1%	0,27	2,5
1984-1987	2,7	1,8%	0,6	2,4%	0,6	2,1%	0,22	1,9

In der dritten Stufe schließlich werden noch die Heizkessel mit Baujahren zwischen 1984 und 1987 gegen moderne Kessel ausgetauscht, was einer PE-Einsparung von 2,8 TWh/a bzw. 1,8 % gleichkommt. Verbunden ist dies mit einer jährlichen CO₂-Minderung um 2,4 % bzw. 0,6 Mio. t und einer Minderung des CO₂-Äquivalentes um 2,1 % bzw. 0,6 Mio. t pro Jahr. Hierzu sind Investitionen von rund 1,9 Mrd. € zu tätigen, was jährliche Kosten von rund 0,22 Mrd. € zur Folge hat.

7.2.3 Kollektoranlagen

Bei den Kollektoranlagen ergeben sich ähnlich wie bei der Wärmedämmung Unterschiede bei den einzelnen Zielgrößen, da je nach Bewertungskriterium unterschiedliche Ausführungsvarianten ausgewählt werden.

Zur Potentialberechnung werden die Ergebnisse der Maßnahmenberechnung und -optimierung mit den Bestandszahlen aus Tabelle 5-7 bis Tabelle 5-9 und den geeigneten Dachflächen aus Tabelle 7-3 multipliziert und anschließend zum Potential aufaddiert werden. Aus **Tabelle 7-8** sind Potentialabschätzungen ersichtlich, wobei sofort auffällt, dass jeweils die ersten beiden Szenarien und die letzten beiden Szenarien keine Unterschiede aufweisen.

Tabelle 7-8: Potentialabschätzung für Kollektoranlagen

Zielgröße	PE-Einsparung		CO ₂ -Einsparung		CO ₂ Äqu-Einsparung		Kosten Mrd. €/a	Investitionen Mrd. €
	absolut TWh/a	relativ -	absolut Mio. t/a	relativ -	absolut Mio. t/a	relativ -		
PE	2,3	1,5%	0,6	2,2%	0,6	2,1%	0,39	4,8
CO ₂	2,3	1,5%	0,6	2,2%	0,6	2,1%	0,39	4,8
PE-k _v	2,0	1,3%	0,5	1,9%	0,5	1,9%	0,26	3,4
CO ₂ -k _v	2,0	1,3%	0,5	1,9%	0,5	1,9%	0,26	3,4

Mit den Zielgrößen PE und CO₂ ist demnach eine Minderung der Primärenergie um 2,3 TWh/a bzw. 1,5 % gegenüber der Ausgangslage und einer CO₂-Einsparung von 0,6 Mio. t pro Jahr bzw. 2,2 % möglich; gleichzeitig können ebenso 0,6 Mio. t CO₂Äqu vermieden werden, was eine Einsparung um 2,1 % bedeutet. Die Investitionen von 4,8 Mrd. € haben jährliche Kosten von knapp 0,4 Mrd. € zur Folge.

Durch die beiden Zielgrößen mit minimalen Vermeidungskosten können die Investitionen um etwa 29 % auf 3,4 Mrd. € und die jährlichen Kosten um 34 % auf rund 0,26 Mrd. € gesenkt werden. Dies

zieht um etwa 12 % verminderte jährlich Einsparungen nach sich, die für Primärenergie rund 2,0 TWh und für CO₂ bzw. CO₂Äqu etwa 0,5 Mio. t betragen.

7.2.4 Photovoltaikanlagen

Die Berechnung der Potentialabschätzung für Photovoltaikanlagen erfolgt analog zu der in Kapitel 7.2.3 beschriebenen Vorgehensweise. Es stellt sich jedoch heraus, dass mit den gewählten Randbedingungen für Photovoltaikanlagen keine Potentialabschätzung ausgeführt werden kann, da aufgrund des sehr günstigen bayerischen Strommixes keine Einsparung an CO₂-Emissionen erzielt wird.

7.2.5 Kompaktleuchtstofflampen

Die Potentialabschätzung für Kompaktleuchtstofflampen (**Tabelle 7-9**) wird mit dem in Kapitel 7.1 getroffenen Ansatz, den Bestandszahlen aus Tabelle 5-3 und den Wohnflächen des jeweiligen Gebäudes ermittelt.

Tabelle 7-9: Potentialabschätzung für Kompaktleuchtstofflampen

PE-Einsparung		CO ₂ -Einsparung		CO ₂ Äqu-Einsparung		Kosten	Investitionen
absolut	relativ	absolut	relativ	absolut	relativ		
TWh/a	-	Mio. t/a	-	Mio. t/a	-	Mrd. €/a	Mrd. €
1,5	1,0%	0,1	0,3%	0,1	0,4%	-0,08	0,1

Demnach können durch den Einsatz von Kompaktleuchtstofflampen anstelle von herkömmlichen Glühlampen jährlich 1,5 TWh Primärenergie und 0,1 Mio. t CO₂ bzw. CO₂Äqu eingespart werden, was einer PE-Minderung um 1,0 %, einer CO₂-Minderung um 0,3 % und einer Minderung des CO₂-Äquivalente um 0,4 % gleichkommt. An Investitionen müssen 0,1 Mrd. € getätigt werden, denen jährliche Kosteneinsparungen von 0,08 Mrd. € gegenüberstehen.

7.3 Potentialabschätzungen für verschiedene Zielgrößen

Aus den im vorhergehenden Kapitel 7.2 aufgeführten Einzelpotentialen wird nun durch Addition das Gesamtpotential gebildet, wobei jetzt eine Unterscheidung nach den Zielgrößen vorgenommen wird.

7.3.1 Primärenergie

Insgesamt kann mit dieser Potentialabschätzung mit der Zielgröße (**Tabelle 7-10**) eine Minderung des Primärenergiebedarfes um 52,1 GWh/a bzw. um 34,0 % gegenüber dem Ausgangsbedarf erreicht werden, wofür jährliche Kosten in Höhe von 6,4 Mrd. €/a aufgewendet werden müssen. Verbunden ist diese PE-Minderung mit einer CO₂-Einsparung in Höhe von 13,4 Mio. t/a bzw. einem CO₂-Äquivalent von 13,8 Mrd. Tonnen pro Jahr; an Investitionen sind rund 110,5 Mrd. € erforderlich. Maßnahmen zur Wärmedämmung besitzen an der gesamten Einsparung einen Anteil 69,2 %, der Austausch von Heizungskesseln 23,6 %.

Aufgrund der in Kapitel 7.1 aufgezeigten Besonderheit bei den Heizungssystemen werden bei den drei restlichen Potentialabschätzungen nur noch die gesamten, durch den Austausch von Heizkessel möglichen Einsparungen, Kosten und Investitionen aufgeführt.

Tabelle 7-10: Potentialabschätzung mit maximaler PE-Minderung als Kriterium

	PE- Einsparung TWh/a	CO ₂ - Einsparung Mio. t/a	CO ₂ Äqu- Einsparung Mio. t/a	Kosten Mrd. €/a	Investi- tionen Mrd. €
Allgemeine Maßnahmen	39,8	10,5	11,0	5,63	102,8
davon					
Wärmedämmung	36,0	9,8	10,3	5,32	97,9
Kollektoranlagen	2,3	0,6	0,6	0,38	4,8
Photovoltaik-Anlagen	0,0	0,0	0,0	0,00	0,0
KLL	1,5	0,1	0,1	-0,08	0,1
Austausch Heizungskessel	12,3	2,9	2,8	0,75	7,6
davon					
Baujahr bis 1978	5,7	1,3	1,3	0,32	3,3
Baujahr 1979 bis 1983	3,9	0,9	0,9	0,24	2,5
Baujahr 1984 bis 1987	2,8	0,6	0,6	0,19	1,9
Gesamt	52,1	13,4	13,8	6,38	110,5
Minderungsanteil	34,0%	50,6%	48,8%	.	.

7.3.2 Kohlendioxid

Von den insgesamt mit dieser Potentialabschätzung einzusparenden 13,4 Mio. Tonnen pro Jahr (**Tabelle 7-11**) stammen fast 73,8 % aus der Wärmedämmung und 21,3 % von Maßnahmen im Heizungsbereich. Gleichzeitig werden pro Jahr 51,8 TWh Primärenergie und 13,8 Mio. Tonnen CO₂Äqu eingespart, wofür aber 5,57 Mrd. € pro Jahr aufgewendet werden müssen. Zur Erreichung dieser Einsparungen müssten 98,1 Mrd. € investiert werden. Insgesamt kann mit diesem Szenario eine Minderung des Kohlendioxid-Ausstoßes im Haushaltsbereich um 50,8 % gegenüber der Ausgangslage erreicht werden.

Tabelle 7-11: Potentialabschätzung für die Zielgröße „maximale CO₂-Minderung“

	PE- Einsparung TWh/a	CO ₂ - Einsparung Mio. t/a	CO ₂ Äqu- Einsparung Mio. t/a	Kosten Mrd. €/a	Investi- tionen Mrd. €
Allgemeine Maßnahmen	39,5	10,5	11,0	4,82	90,5
davon					
Wärmedämmung	35,7	9,9	10,3	4,51	85,5
Kollektoranlagen	2,3	0,6	0,6	0,38	4,8
Photovoltaik-Anlagen	0,0	0,0	0,0	0,00	0,0
KLL	1,5	0,1	0,1	-0,08	0,1
Austausch Heizungskessel	12,3	2,9	2,8	0,75	7,6
Gesamt	51,8	13,4	13,8	5,57	98,1
Minderungsanteil	33,8%	50,8%	49,0%	.	.

7.3.3 Primärenergie-Vermeidungskosten

In der Potentialabschätzung für die Zielgröße PE-Vermeidungskosten werden, wie in **Tabelle 7-12** angeführt, 48,8 TWh Primärenergie pro Jahr eingespart, was einer Minderung des Primärenergiebedarfes um 31,9 % entspricht. 67,6 % des Gesamtpotentials werden alleine durch Maßnahmen bei der Wärmedämmung, weitere 25,2 % durch Maßnahmen im Heizungsbereich eingespart.

Tabelle 7-12: Potentialabschätzung mit minimalen PE-Vermeidungskosten als Kriterium

	PE- Einsparung TWh/a	CO ₂ - Einsparung Mio. t/a	CO ₂ Äqu- Einsparung Mio. t/a	Kosten Mrd. €/a	Investi- tionen Mrd. €
Allgemeine Maßnahmen	36,5	9,7	10,2	4,10	78,6
davon					
Wärmedämmung	33,0	9,1	9,5	3,92	75,1
Kollektoranlagen	2,0	0,5	0,5	0,25	3,4
Photovoltaik-Anlagen	0,0	0,0	0,0	0,00	0,0
KLL	1,5	0,1	0,1	-0,08	0,1
Austausch Heizungskessel	12,3	2,9	2,8	0,75	7,6
Gesamt	48,8	12,6	13,0	4,85	86,3
Minderungsanteil	31,9%	47,7%	45,9%	.	.

Mit diesem Ansatz verbunden ist eine Minderung der CO₂-Emissionen um jährlich 12,6 Mio. Tonnen oder 47,7 % gegenüber der Ausgangslage; das CO₂-Äquivalent wird um jährlich 13,0 Mio. Tonnen oder 45,9 % gegenüber dem Ausgangszustand vermindert. Hierzu sind Investitionen in Höhe von 86,3 Mrd. € zu tätigen, die jährliche Kosten von 4,85 Mrd. € nach sich ziehen.

7.3.4 Kohlendioxid-Vermeidungskosten

Bei der Potentialabschätzung mit der Zielgröße CO₂-Menge ergibt sich insgesamt ein Einsparpotenti- al von 47,0 % bzw. 12,4 Mio. Tonnen CO₂ (**Tabelle 7-13**).

Tabelle 7-13: Potentialabschätzung mit minimalen CO₂-Vermeidungskosten als Kriterium

	PE- Einsparung TWh/a	CO ₂ - Einsparung Mio. t/a	CO ₂ Äqu- Einsparung Mio. t/a	Kosten Mrd. €/a	Investi- tionen Mrd. €
Allgemeine Maßnahmen	36,3	9,5	10,0	3,65	71,5
davon					
Wärmedämmung	32,9	8,9	9,3	3,47	67,9
Kollektoranlagen	2,0	0,5	0,5	0,25	3,4
Photovoltaik-Anlagen	0,0	0,0	0,0	0,00	0,0
KLL	1,5	0,1	0,1	-0,08	0,1
Austausch Heizungskessel	12,3	2,9	2,8	0,75	7,6
Gesamt	48,6	12,4	12,8	4,40	79,1
Minderungsanteil	31,8%	47,0%	45,2%	.	.

Parallel dazu könnten hiermit 48,6 GWh/a an Primärenergie und 12,8 Mio. Tonnen CO₂Äqu eingespart werden. Verbunden ist dies mit Investitionen von 79,1 Mrd. € und jährlichen Kosten von 4,4 Mrd. €

7.4 Vergleich der Potentialabschätzungen

Der Vergleich der Potentialabschätzung (**Tabelle 7-14**) liefert auf den ersten Blick erwartungsgemäß das Ergebnis, dass bei der Primärenergieeinsparung die Potentialabschätzung mit der Zielgröße PE und bei der CO₂-Einsparung die mit der Zielgröße CO₂ den jeweils größten Wert aufweisen.

Tabelle 7-14: Quervergleich der Potentialabschätzungen

Potential mit Zielwert	PE-Einsparung TWh/a	CO ₂ -Einsparung Mio. t/a	CO ₂ Äqu-Einsparung Mio. t/a	Kosten Mrd. €/a	Investitionen Mrd. €
PE	52,1	13,4	13,8	6,38	110,5
CO ₂	51,8	13,4	13,8	5,57	98,1
PE-k _v	48,8	12,6	13,0	4,85	86,3
CO ₂ -k _v	48,6	12,4	12,8	4,40	79,1

Bei näherer Betrachtung erweisen sich die Unterschiede zwischen den Potentialabschätzungen der einzelnen Zielgrößen als nicht sehr groß. Aus diesem Grund wird die Relation der Potentialabschätzung untereinander untersucht, in dem die einzelnen Szenarien jeweils auf den Maximalwert aller bezogen werden (**Tabelle 7-15**). Daraus ist ersichtlich, dass bei den Einsparungen die Abweichungen vom Maximalwert zwischen Null und etwa 7,5 %, bei den jährlichen Kosten und den Investitionen hingegen etwa zwischen 11 % und 28 % liegen.

Tabelle 7-15: Relationen der Potentialabschätzungen, bezogen auf den jeweiligen Maximalwert

Potential mit Zielwert	PE-Einsparung	CO ₂ -Einsparung	CO ₂ Äqu-Einsparung	Kosten	Investitionen
PE	100,0%	99,7%	99,7%	100,0%	100,0%
CO ₂	99,5%	100,0%	100,0%	87,3%	88,8%
PE-k _v	93,7%	93,8%	93,7%	76,0%	78,1%
CO ₂ -k _v	93,4%	92,4%	92,3%	68,9%	71,6%

Bezieht man die Ergebnisse der Potentialabschätzungen nicht auf den Maximalwert innerhalb einer Sparte, sondern auf die Einwohnerzahl Bayerns, so erkennt man aus **Tabelle 7-16**, dass pro Kopf jährliche Kosten zwischen 519 €/a (Zielgröße PE) und 358 €/a für die Zielgröße CO₂-k_v anfallen. Von den ursprünglich 7,13 t pro Einwohner und Jahr kann durch Maßnahmen im Haushaltsbereich etwa eine Tonne eingespart werden.

Tabelle 7-16: Ergebnisse der Potentialabschätzungen, bezogen auf Einwohnerzahl

Potential mit Zielwert	PE-Einsparung kWh/Ew.*a	CO ₂ -Einsparung kg/Ew.*a	CO ₂ Äqu-Einsparung kg/Ew.*a	Kosten €/Ew.*a	Investitionen €/Ew.
PE	4.234	1.086	1.121	519	8.982
CO ₂	4.207	1.090	1.125	463	7.978
PE-k _v	3.967	1.022	1.054	394	7.014
CO ₂ -k _v	3.954	1.008	1.038	358	6.433

Eine weitere Vergleichsmöglichkeit bietet **Tabelle 7-17**, in der die über die gesamte Potentialabschätzung gebildeten spezifischen Vermeidungskosten aufgezeigt sind. Darin wird deutlich, dass die Potentialabschätzung für die Zielgröße CO₂-Vermeidungskosten die geringsten spezifischen Vermeidungskosten aufweist.

Tabelle 7-17: Durchschnittliche spezifische Vermeidungskosten der Potentialabschätzungen

Potential mit Zielwert	PE-Vermeidungskosten €/kWh	CO ₂ -Vermeidungskosten €/kg	CO ₂ Äqu-Vermeidungskosten €/kg
PE	0,123	0,478	0,463
CO ₂	0,108	0,416	0,403
PE-k _v	0,099	0,386	0,374
CO ₂ -k _v	0,090	0,355	0,344

Sortiert man die Einzelmaßnahmen aller Potentialabschätzungen aufsteigend nach den Vermeidungskosten und kumuliert die jährlichen Kosten und die dabei eingesparte Menge an Primärenergie auf, so kann man hieraus die Kosten-Vermeidungskurve für PE (Bild 7-1) erstellen.

Darin kann abgelesen werden, welche jährlichen Kosten für eine bestimmte Einsparung aufgewendet werden müssen, und welche Potentialabschätzung sich für verschiedene Vermeidungsmengen bzw. Einsparungen als die günstigste erweist. So kann bei einem festen jährlichen Investitionsvolumen aus dem Bild abgelesen werden, welche Einsparung damit erzielt werden kann.

Ferner erkennt man daraus, dass alle Potentialabschätzungen gegenüber dem Ausgangszustand etwa 3,5 TWh/a bei sogar geringeren Kosten einsparen, was im Bild an der negativen Steigung der Kurve im Ursprung zu erkennen ist. Ursache für diese Einsparung sind hauptsächlich die Kompaktleuchtstofflampen, aber auch Maßnahmen an Heizungsanlagen im MFH oder ZFH.

Nach diesem Punkt teilt sich der Verlauf der Kosten gegenüber der Einsparung der Szenarien in zwei Hauptzweige auf. Der obere, also teurere Hauptzweig wird von den Potentialabschätzungen mit Ziel einer maximalen Einsparung an PE und CO₂ gebildet. Etwa 7 TWh Primärenergie pro Jahr können mit diesen beiden kostenneutral eingespart werden.

Ab etwa 35 TWh PE-Einsparung teilt sich auch dieser Zweig auf, wobei die Potentialabschätzung mit der Zielgröße PE über dem von CO₂ liegt. Der untere und damit günstigere Hauptzweig wird von den beiden Potentialabschätzungen mit den Zielgrößen PE-k_v und CO₂-k_v gebildet, die als Ziel haben, eine möglichst günstige Einsparung aufzuweisen. Der Verlauf dieser beiden Kurven deckt sich weit-

gehend, doch geht die Kurve für die Zielgröße PE- k_v noch etwas über die von CO₂- k_v hinaus. Mit diesen beiden Ansätzen können fast 11 TWh pro Jahr an Primärenergie und damit etwa 4 TWh mehr als beim oberen Zweig eingespart werden.

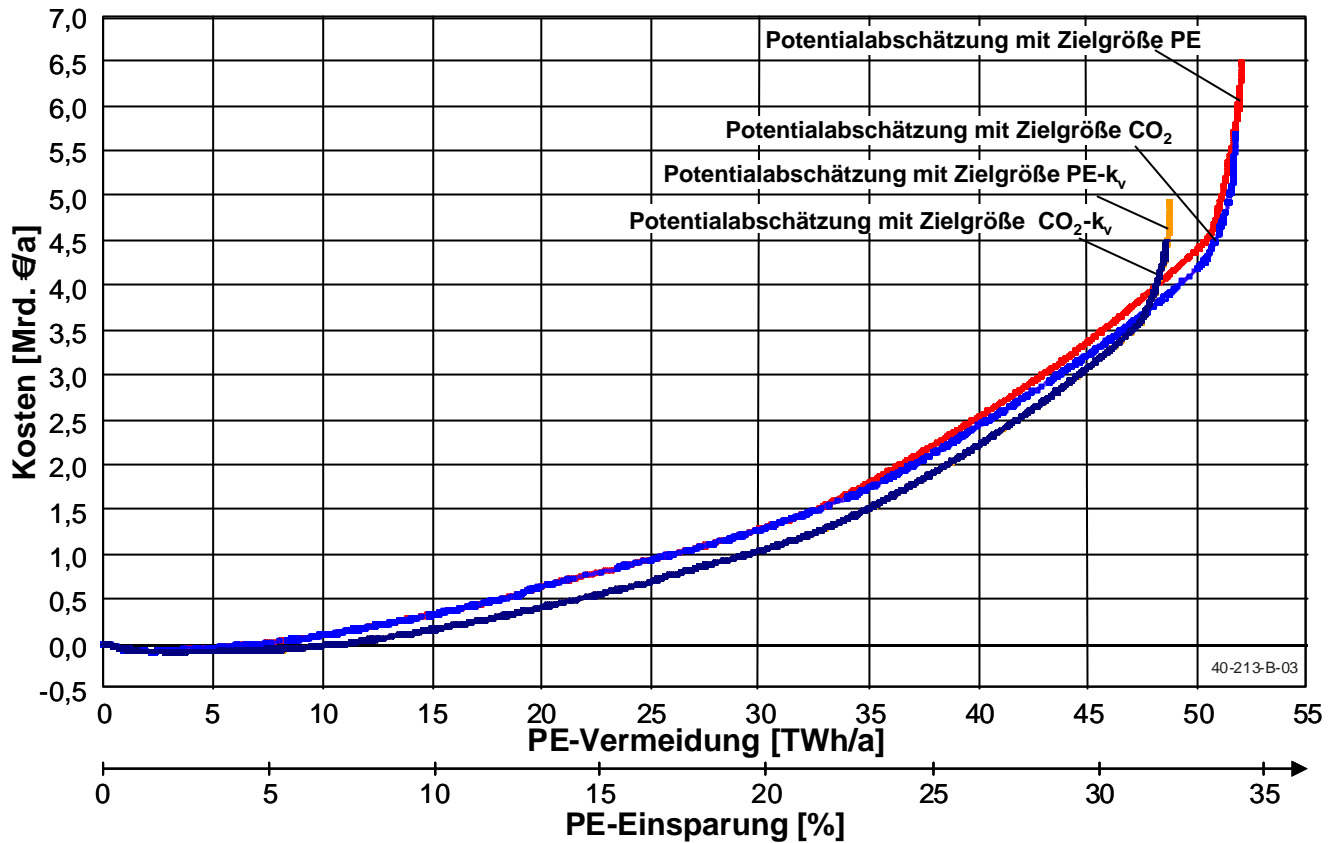


Bild 7-1: Kosten-Vermeidungskurve für PE

Für alle vier genannten Potentialabschätzungen gilt hier, dass das Maximum der Einsparung jeweils nur mit unverhältnismäßig hohen Kosten erreicht werden kann, was durch den fast senkrechten Verlauf der Kurven nach oben angezeigt wird.

Über die ganzen Kurven betrachtet können etwa 50 % der Einsparung mit etwa 13 % der jährlichen Kosten eingespart werden; für 75 % Einsparung sind bereits etwa 35 % der jährlichen Kosten und für 90 % maximale Einsparung müssen 58 % der jährlichen Kosten aufgewendet werden.

Reiht man die Einzelmaßnahmen aller Potentialabschätzungen nun nach den **CO₂-Vermeidungskosten** auf und kumuliert die jährlichen Kosten und die dabei eingesparte Menge an CO₂ auf, so kann hieraus die Kosten-Vermeidungskurve für CO₂ (**Bild 7-2**) erstellt werden, die ein gewisse Ähnlichkeiten mit dem vorigen Bild 7-1 aufweist.

Man erkennt darin, dass alle Potentialabschätzungen etwa 0,2 Mio. Tonnen pro Jahr mit einer Kosteneinsparung von 0,1 Mrd. € pro Jahr vermeiden können, was im Bild an der negativen Steigung der Kurve im Ursprung zu erkennen ist. Ursache dafür sind hauptsächlich die Kompaktleuchtstofflampen, aber auch Maßnahmen an Heizungsanlagen im MFH oder ZFH. Danach teilt sich der Verlauf der Kurven in zwei Hauptzweige auf.

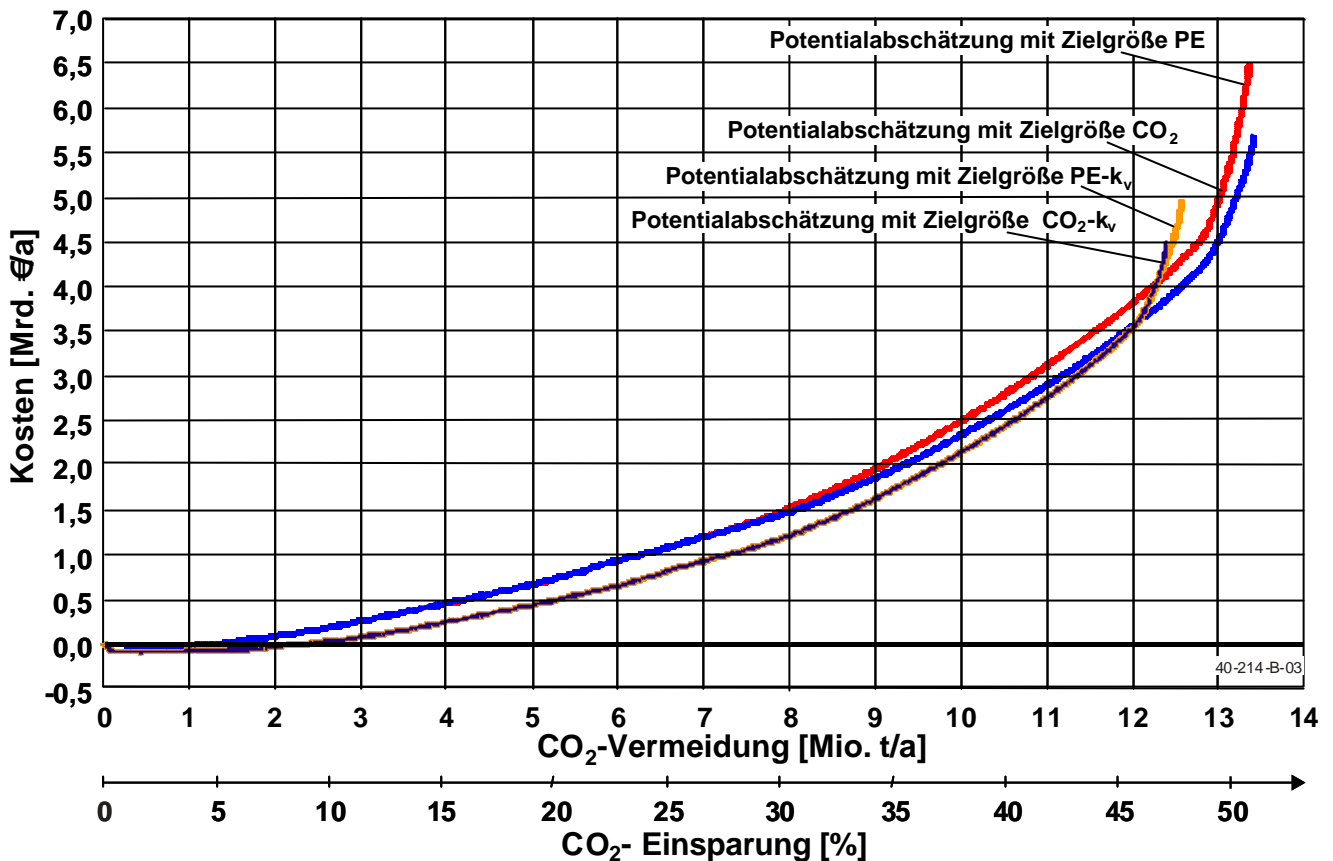


Bild 7-2: Kosten-Vermeidungskurve für CO₂

Der obere Hauptzweig wird, wie bereits bei der Kosten-Vermeidungskurve für Primärenergie, von den Potentialabschätzungen PE und CO₂ gebildet. Etwa 1 Mio. Tonnen CO₂ pro Jahr können mit diesen beiden kostenneutral eingespart werden. Ab etwa 8 Mio. t CO₂-Einsparung teilt sich auch dieser Zweig auf, wobei die Zielgröße PE über der von CO₂ liegt.

Der untere und damit günstigere Hauptzweig wird wieder von den beiden Potentialabschätzungen für die Zielgrößen PE-k_v und CO₂-k_v gebildet, die als Ziel haben, eine möglichst günstige Einsparung aufzuweisen. Der Verlauf dieser beiden Kurven deckt sich weitgehend, nur geht die für PE-k_v noch etwas über die von CO₂-k_v hinaus. Mit diesen beiden können etwa 2,5 Mio. t pro Jahr an CO₂ und damit etwa 1,5 Mio. t. mehr als beim oberen Zweig eingespart werden.

Für alle vier Potentialabschätzungen gilt auch hier, dass das Maximum der Einsparung jeweils auch nur mit unverhältnismäßig hohen Kosten erreicht werden kann, was durch den fast senkrechten Verlauf der Kurven nach oben angezeigt wird.

Über die ganzen Kurven betrachtet können etwa 50 % der Einsparung mit etwa 16 % der jährlichen Kosten eingespart werden; für 75 % Einsparung sind bereits etwa 40 % der jährlichen Kosten und für 90 % maximale Einsparung müssen 65 % der jährlichen Kosten aufgewendet werden.

7.5 Sensitivitätsanalysen und Variationsrechnungen

Mit Hilfe von Sensitivitätsanalysen und Variationsrechnungen soll aufgezeigt werden, welche Abhängigkeiten der Ergebnisse von den Eingangsgrößen besteht. Hierzu werden verschiedene Fälle untersucht, deren Beschreibung und Ergebnisse in den folgenden Unterkapiteln dargestellt werden.

Änderung der Anteile der Zentralheizungsanlagen beim Ersatz von Altkesseln

Im Unterschied zu den Randbedingungen werden die Anteile für diese Variationsrechnung auf die in der **Tabelle 7-18** dargestellten Werte verändert und die Berechnung durchgeführt.

Tabelle 7-18: Veränderte Anteile der Zentralheizungsanlagen bei Altanlagenersatz

	WP	Pellet- heizung	Stück- holz	Holzver- gaser- kessel	Hack- schnittel- kessel	NT	BWK	Biogas- BHKW
Auszutauschender Heizkessel befeuert mit Erdgas								
EFH	20,0%	10,0%	4,0%	4,0%	10,0%	15,0%	30,0%	7,0%
ZFH	20,0%	10,0%	4,0%	4,0%	10,0%	15,0%	30,0%	7,0%
MFH	15,0%	6,0%	4,0%	4,0%	4,0%	32,0%	35,0%	0,0%
Auszutauschender Heizkessel befeuert mit Heizöl								
EFH	20,0%	10,0%	4,0%	4,0%	10,0%	15,0%	30,0%	7,0%
ZFH	20,0%	10,0%	4,0%	4,0%	10,0%	15,0%	30,0%	7,0%
MFH	15,0%	6,0%	4,0%	4,0%	4,0%	32,0%	35,0%	0,0%

Das Ergebnis dieser Berechnung ist sowohl absolut, als auch im Vergleich zu den Ausgangsrandbedingungen in **Tabelle 7-19** dargestellt. Daraus ist zu erkennen, dass sich nur geringfügige Veränderungen gegenüber der Ausgangslage ergeben.

Tabelle 7-19: Potentialabschätzungen aus dem Szenario mit dem veränderten Altanlagenersatz

Potential mit Zielwert	PE- Einsparung TWh/a	CO ₂ - Einsparung Mio. t/a	CO ₂ Äqu ⁻ Einsparung Mio. t/a	Kosten Mrd. €/a	Investi- tionen Mrd. €
PE	53,4	13,7	14,1	6,55	111,1
CO ₂	53,2	13,7	14,2	5,74	98,8
PE-k _v	50,2	12,9	13,3	5,02	86,9
CO ₂ -k _v	50,0	12,7	13,1	4,56	79,8
Relation gegenüber dem Ausgangszustand					
PE	102,6%	102,6%	102,5%	102,6%	100,6%
CO ₂	102,6%	102,6%	102,5%	103,0%	100,7%
PE-k _v	102,8%	102,7%	102,7%	103,4%	100,8%
CO ₂ -k _v	102,8%	102,8%	102,7%	103,7%	100,8%

Änderung des Strommixes

Der als Randbedingung vorgegebene Strommix für Bayern ist aufgrund der Vernetzung des Strommarktes rein rechnerischer Natur, so dass der Einfluss des Stromes am Beispiel des Strommixes der Bundesrepublik aufgezeigt werden soll. Hierdurch ändert sich nicht nur die Einsparung, sondern auch die durch die Haushalte verursachte Emissionsmenge, die von der Ausgangslage mit etwa 26,6 Mio. t

CO₂ bzw. 28,5 Mio. t CO₂Äqu auf etwa 35,0 Mio. t CO₂ bzw. 36,9 Mio. t CO₂Äqu steigt. Der Ergebnis dieser Berechnung ist in **Tabelle 7-20** dargestellt.

Hieraus ist erkennbar, dass durch eine veränderte Maßnahmenauswahl die PE-Einsparung etwa zwischen 5,5 % und 5,9 % steigt, die Einsparung an Emissionen hingegen zwischen 8 % und 9 %. Die Kosten bleiben bei diesem Ansatz nahezu unverändert, doch muss etwa 6 % bis 9 % mehr Kapital investiert werden.

Tabelle 7-20: Potentialabschätzungen aus dem Szenario bei verändertem Strommix

Potential mit Zielwert	PE-Einsparung TWh/a	CO ₂ -Einsparung Mio. t/a	CO ₂ Äqu-Einsparung Mio. t/a	Kosten Mrd. €/a	Investitionen Mrd. €
PE	54,9	14,5	14,9	6,48	117,4
CO ₂	54,6	14,5	14,9	5,69	105,2
PE-k _v	51,6	13,7	14,1	4,95	93,2
CO ₂ -k _v	51,4	13,5	13,9	4,50	86,0
	Relation gegenüber den Ausgangszustand				
PE	105,5%	108,2%	108,1%	99,7%	106,3%
CO ₂	105,5%	108,2%	108,1%	100,0%	107,3%
PE-k _v	105,9%	108,7%	108,6%	99,7%	108,0%
CO ₂ -k _v	105,9%	108,9%	108,8%	99,6%	108,7%

8 Maßnahmen in der Land- und Forstwirtschaft

Die in diesem Kapitel vorgestellten Maßnahmen behandeln nicht Einsparungsmöglichkeiten im herkömmlichen Sinne wie Wärmedämmung oder Senkung des Energiebedarfes, sondern Maßnahmen, die auf Bindung bzw. Senkung von CO₂- bzw. CO₂Äqu-Emissionen abzielen.

Die Maßnahmen in der Land- und Forstwirtschaft können in drei Gruppen unterteilt werden. Die erste Gruppe wird von Maßnahmen gebildet, die CO₂ aus der Atmosphäre in Form von Pflanzen speichern. Als Beispiele hierzu werden der Anbau von Winterweizen und die (Wieder-)Aufforstung angeführt. Die zweite Gruppe hingegen umfasst Maßnahmen, die ähnlich wie im Haushaltssektor Energieverbrauch und Emissionen mindern. Hier wird als Beispiel die Biodieselerzeugung aufgezeigt. Die dritte Gruppe repräsentiert mit der Schweinezucht eine Maßnahme aus der Veredelungswirtschaft.

8.1 Winterweizenanbau

Für die Steigerung der Produktion von Winterweizen werden geeignete Flächen als vorhanden unterstellt. Die Maschinen zur Bestellung und Aberntung dieser Felder sind auf dem landwirtschaftlichen Hof vorhanden, eine erhöhte Abnutzung wird nicht berücksichtigt.

Bei einem mittleren Ertrag von 6.800 kg Winterweizen pro Hektar und Jahr kann für eine Tonne Winterweizen die Bilanz entsprechend **Tabelle 8-1** aufgestellt werden.

Tabelle 8-1: Jahresemissionsbilanz für Winterweizen

	sofortige Freisetzung kg CO ₂ /t	Speicherung kg CO ₂ _{phr} /t	sofortige Freisetzung kg CO ₂ Äqu/t	Speicherung kg CO ₂ Äqu-phr/t
Diesel	41	.	45	.
Saatgut	46	.	47	.
PSM	16	.	18	.
Dünger	103	.	225	.
Strom	0	.	0	.
CO ₂ _{phr}	.	1.425	.	1.425
Summe	207	1.425	335	1.425
Bindungssaldo	1.218		1.090	

Über den Dieseleinsatz, durch Saatgut, Pflanzenschutzmittel, Düngemittel und Stromeinsatz fallen demnach Emissionen von 207 kg CO₂ bzw. 335 kg CO₂Äqu pro Tonne Winterweizen an.

Dem gegenüber steht eine Menge von 1.425 kg CO₂_{phr}, bzw. CO₂Äqu-phr pro Tonne Weizen, das über die Photosynthese in den Körnern gebunden wurde. Als Bindungssaldo ergeben sich 1.218 kg CO₂ bzw. 1.090 kg CO₂Äqu pro Tonne Winterweizen.

Wird dieser Winterweizen nun exportiert, so wird die im Korn gespeicherte Menge an CO₂ ausgeführt, dass als Folge effektiv eine Minderung der CO₂-Menge innerhalb Bayerns in Höhe des Bindungssaldos erreicht wird.

Würde der Winterweizen innerhalb Bayerns verbraucht, so würde das in ihm gebundene CO₂ relativ kurzfristig wieder freigesetzt werden. Dieses CO₂ wurde zwar während der Wachstumsphase eingelagert, allerdings müssten die herstellungsbedingten Emissionen hinzugerechnet werden.

8.2 Wirtschaftswald

Forstet man eine Stillungsfläche wieder auf, so dauert es über ein Jahrhundert, bis diese Fläche zu einem wirtschaftlich nutzbaren Wald herangewachsen ist. Die Fichte braucht dafür in der Regel etwa 110 Jahre, die Buche und die Tanne 120 und die Eiche 160 Jahre, bis ein optimaler Fällzeitpunkt erreicht wird [28].

Im europäischen Mittel bindet ein Hektar Wirtschaftswald 5.300 kg CO₂ pro ha und Jahr. Im mitteleuropäischen Raum geht man von bis zu 10.000 kg pro ha und Jahr aus; dieser Wert gilt auch für Bayern. Für diese Untersuchung wird ein Bindungspotential von 8.500 kg CO₂ pro Jahr angesetzt, als Ertrag fallen durch nachhaltige Forstwirtschaft rund 3,8 Festmeter Holz (etwa 3,268 t) pro Hektar Waldfläche und Jahr an.

Der größte Teil des im Kohlendioxid enthaltenen Kohlenstoffs wird längerfristig im Stamm- und Astholz gespeichert, der geringere Anteil in Nadeln bzw. Blättern, kleineren Ästen und Zweigen.

8.3 Biodieselerzeugung

Die Produktion von Rapsmethylester (RME, allgemein auch als Biodiesel bezeichnet) ist mit einer Reihe von Koppelprodukten verbunden. Für die Betrachtung der Umweltwirkung von RME spielt es eine große Rolle, ob diese Nebenprodukte unberücksichtigt bleiben oder als marktfähige Produkte berücksichtigt werden.

Für die Maßnahme werden folgende zwei Betrachtungsweisen verfolgt:

- Die Nebenprodukte sind marktfähig und werden aufgrund ihres Energieinhaltes berücksichtigt.
- Die Nebenprodukte werden als Abfallprodukte nicht weiter berücksichtigt.

In der Untersuchung werden die bei der RME Erzeugung anfallenden und die entsprechenden dabei gespeicherten CO_{2p}hr-Mengen berücksichtigt, bezogen auf einen Hektar Anbaufläche bzw. einen Liter RME. Grundlage hierfür bildet der durchschnittliche jährliche Ertrag von einem Hektar Rapsanbaufläche.

Im durchschnittlichen Ertrag von etwa 3.000 kg Rapskörner pro ha sind etwa 6.060 kg Kohlendioxid gebunden (**Tabelle 8-2**).

Tabelle 8-2: Gebundenes CO_{2p}hr in der RME-Kette

	Ernte-/ Anfall- menge kg/ha*a	gebunde- nes CO _{2p} hr kg/ha*a	Ernte-/ Anfall- menge kg/l RME	gebunde- nes CO _{2p} hr kg/l RME
Rapskörner	3.003	6.063	2,25	4,55
Rapsstroh*	5.106	7.495	3,83	5,63
Rapsöl	1.219	3.610	0,92	2,71
Rapssschrot*	1.772	2.432	1,33	1,83
Fettsäure*	12	35	0,01	0,03
RME	1.172	3.345	0,88	2,51
Fettsäure*	38	107	0,03	0,08
Glycerin*	155	178	0,12	0,13

* Nebenprodukte

Aus den Rapskörnern können 1.200 kg Rapsöl mit einer gespeicherten $\text{CO}_{2\text{phr}}$ -Menge von 3.600 kg gepresst werden. Dieses Rapsöl wird zu 1.172 kg Rapsmethylester (1.323 l) konvertiert, in dem noch etwa 3.350 kg $\text{CO}_{2\text{phr}}$ bzw. 55 % des ursprünglichen $\text{CO}_{2\text{phr}}$ enthalten sind. Als Nebenprodukte fallen bereits auf dem Feld das Rapsstroh (5.100 kg pro ha mit knapp 7.500 kg $\text{CO}_{2\text{phr}}$), bei der Rapsölmühle 1.770 kg Rapsschrot mit 2.432 kg $\text{CO}_{2\text{phr}}$ und 12 kg Fettsäure mit 35 kg $\text{CO}_{2\text{phr}}$ an. Bei der Umesterung ergeben sich schließlich noch 38 kg Fettsäure (107 kg $\text{CO}_{2\text{phr}}$) und 155 kg 80 %-iges Glycerin (178 kg $\text{CO}_{2\text{phr}}$). Bezieht man diese Werte auf einen Liter RME, so ergeben sich die rechts in der Tabelle 8-2 [29] angeführten Werte.

Insgesamt entstehen bei der RME-Erzeugung Nebenprodukte mit einer gespeicherten $\text{CO}_{2\text{Äqu}}$ -Menge von 10.246 kg $\text{CO}_{2\text{Äqu-phr}}$ pro Hektar Anbaufläche und Jahr.

Zusätzlich zu den in den Nebenprodukten gespeicherten $\text{CO}_{2\text{phr}}$ -Mengen fallen bei den einzelnen Produktionsschritten weitere CO_2 -Emissionen aufgrund von Energie-, Betriebsstoff- und Betriebsmitelaufwendungen an. Ohne Stroh- und Reststoffverwertung errechnen sich pro Hektar an energiebedingten CO_2 -Emissionen rund 1.759 kg. Diese Menge erhöht sich im Zuge einer gezielt verfolgten Reststoffverwertung, wobei eine Aufteilung auf Haupt- und Nebenprodukte notwendig wird. Bei kalorischer Aufteilung entfallen auf das Hauptprodukt RME insgesamt rund 1.021 kg $\text{CO}_{2\text{Äqu}}$ pro Hektar. Je nach Betrachtungsweise mit oder ohne Reststoffverwertung (RSV) ergeben sich pro Liter RME nach [30] folgende in **Tabelle 8-3** enthaltenen Werte.

Tabelle 8-3: Energiebedingte CO_2 und $\text{CO}_{2\text{Äqu}}$ -Emissionen bei der RME-Herstellung

	ohne	mit	ohne	mit
	Stroh- und Reststoffverwertung		Stroh- und Reststoffverwertung	
	kg CO_2/ha^*a	kg CO_2/ha^*a	kg $\text{CO}_{2\text{Äqu}}/\text{ha}^*a$	kg $\text{CO}_{2\text{Äqu}}/\text{ha}^*a$
Feldarbeit	935	355	952	362
Transport	105	60	106	61
Rapsöl	193	110	201	115
RME	451	420	451	435
Verteilung	76	76	77	77
Summe	1.759	1.021	1.786	1.049

Fasst man die diese Zahlenwerte zusammen und stellt sie den Werten von Dieselmotorkraftstoff gegenüber, so erhält man das in **Tabelle 8-4** dargestellte Ergebnis.

Tabelle 8-4: Biogene und energiebedingte CO_2 -Emissionen von RME und Diesel

	RME ohne RSV g CO_2/l	RME mit RSV g CO_2/l	Dieselmotorkraftstoff g CO_2/l
Herstellung	1.329	771	274
Nutzung	2511*	2511*	2.759
Gesamt	3.831	3.277	3.033

RSV: Reststoffverwertung

* biogenen Ursprungs, freigesetzt beim Dieselprozeß

Die Herstellung von RME ist mit einer aus dem Energieeinsatz resultierenden CO_2 -Menge von 771 g pro Liter mit Reststoffverwertung bzw. mit 1.329 g pro Liter ohne Reststoffverwertung verbunden, die Herstellung von Diesel dagegen nur mit 274 g pro Liter.

Berücksichtigt man zusätzlich die Methan- und Lachgasemissionen, so ergibt sich das in **Tabelle 8-5** aufgezeigte Ergebnis, wonach sich die Emissionen beim RME nur leicht, beim Diesel hingegen um fast 10 % gegenüber der reinen CO_2 -Betrachtung erhöhen.

Tabelle 8-5: Biogene und energiebedingte CO_2 -Emissionen von RME und Diesel

	RME ohne RSV g CO_2 -Äqu/l	RME mit RSV g CO_2 -Äqu/l	Diesel- kraftstoff g CO_2 /l
Herstellung	1.350	792	356
Nutzung	2536*	2536*	3.309
Gesamt	3.886	3.328	3.665

RSV: Reststoffverwertung

* biogenen Ursprungs, freigesetzt beim Dieselprozeß

Bei der Verbrennung von einem Liter RME werden 2.511 g CO_2 bzw. 2.536 g CO_2 -Äqu am Ort des Verbrauchs freigesetzt. Das CO_2 ist jedoch biogenen Ursprungs und wurde aufgrund der vorherigen Bindung durch den Rapsanbau aus der Atmosphäre entnommen. Bei der Dieselverbrennung werden 2.759 g CO_2 bzw. 3.309 g CO_2 -Äqu pro Liter freigesetzt, die aber fossilen Ursprungs sind und somit zusätzlich in die Atmosphäre gelangen. Werden nun die bei der Verbrennung von RME freiwerdenden CO_2 -Emissionen aufgrund ihres biogenen Ursprungs als neutral angesetzt, so müssen die Methan- und Lachgasemissionen trotzdem berücksichtigt werden, da sie keine Minderung des Treibhauseffektes, sondern sogar eine zusätzliche Belastung hervorrufen.

Die Nutzung von RME mit Reststoffverwertung spart gegenüber der Dieselnutzung mit RSV 2.262 g CO_2 bzw. 2.873 g CO_2 -Äqu pro Liter ein, ohne Reststoffnutzung sind es noch 1.704 g CO_2 bzw. 2.315 g CO_2 -Äqu pro Liter. Hinzu kommt, dass die bei der RME-Erzeugung anfallenden Reststoffe Rapsstroh, Rapsschrot als Futtermittel und die Fettsäure bzw. das Glycerin industriell weiterverwendet werden können. Der Ersatz von Sojaschrot durch Rapsschrot als Futtermittel ist nicht nur problemlos möglich, sondern bringt auch noch eine Gutschrift an Emissionen, die aus dem soweit erforderlichen Transport von Soja aus Übersee nach Europa resultieren.

8.4 Schweinezucht

Die Erzeugung von Schweinefleisch dient als ein Beispiel aus dem Bereich der Veredelungswirtschaft. Hierfür werden folgende Annahmen getroffen:

- Ausgangspunkt ist die Stamm-Muttersau
- die Futtermittel entsprechen in Menge und Zusammensetzung den Vorgaben aus [29]
- die Bestandteile der Futtermittel werden, soweit möglich, auf dem eigenen Hof produziert
- von den Ferkeln wird der Bestandserhalt gesichert, jedoch keine Bestandsausweitung angestrebt
- Emissionen durch Strombezug, Dieselverbrauch, PSM, Dünger und Saatgut werden über die vorhandenen Verbrauchswerte angesetzt und errechnet.

Die Futtermittel werden, soweit möglich, im eigenen Betrieb erzeugt; die dafür notwendigen Ackerflächen errechnen sich über die jeweils benötigten Mengen und die zugehörigen mittleren Erträge für Bayern. Die in Bayern nicht produzierbaren Futtermittel wie Soja oder das Fischmehl werden vom Schweinezüchter im Handel erworben.

Die Stamm-Muttersau gründet den in **Bild 8-1** einen Stammbaum, in dem nicht nur die Anzahl und die Verwendung der jeweiligen Nachkommen, sondern auch die hierzu erforderlichen Anbauflächen von 0,99 ha, die CO₂_{phr}-Mengen im Futter und die bei der Schlachtung im Fleisch enthaltenen CO₂_{phr}-Bindungsmengen enthalten sind.

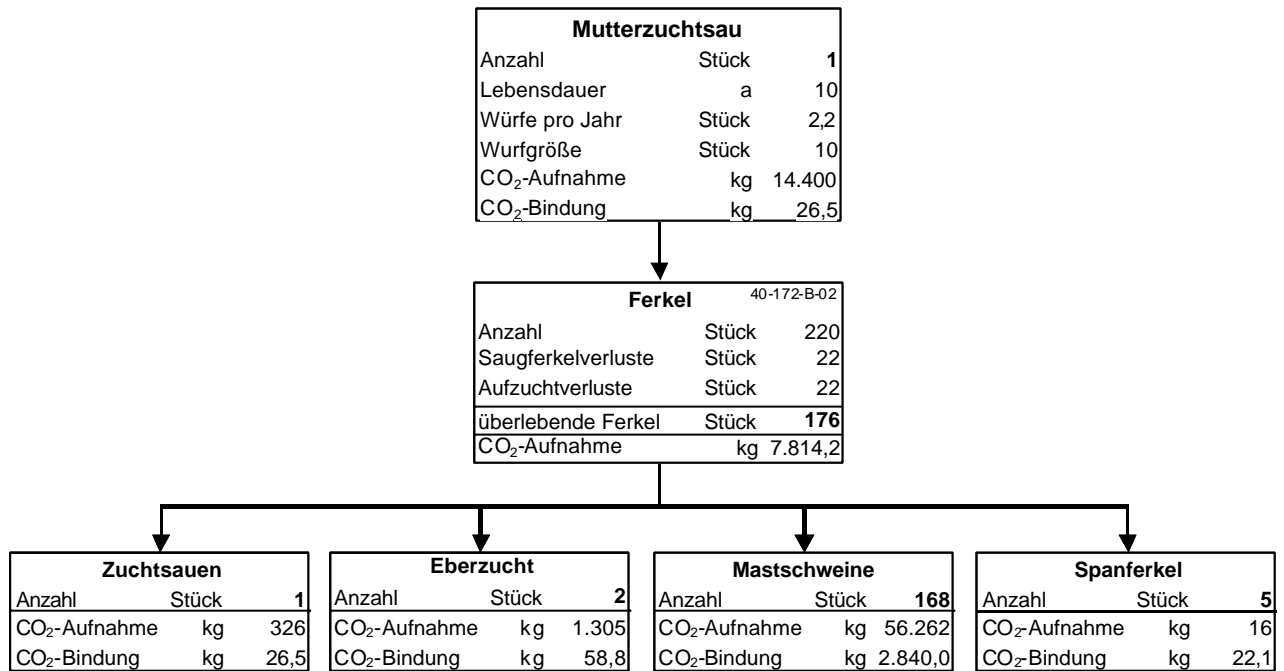


Bild 8-1: Stammbaum einer Muttersau mit CO₂-Bilanz

Summiert man die hierzu notwendigen CO₂_{phr}-Mengen auf, so ergeben sich pro 0,99 Hektar für diesen Stammbaum und dem Bilanzzeitraum von 10 Jahren 80.124 kg CO₂_{phr} als Input, im Fleisch ist bei der Schlachtung der Tiere nur noch 2.974 kg CO₂_{phr} gebunden. Pro Jahr und Hektar bedeutet dies einen CO₂_{phr}-Input im Futtermittel von 8.060 kg, bei der Bereitstellung der Futtermittel fallen zusätzlich 1.190 kg CO₂ bzw. 1.514 kg CO₂_{Äqu} an. Für die Beleuchtung und die Beheizung des Stalles werden noch zusätzlich 246 kg CO₂ bzw. 281 kg CO₂_{Äqu} freigesetzt (**Tabelle 8-6**).

Tabelle 8-6: Flächenspezifische CO₂-Menge des Stammbaumes "Muttersau"

	CO ₂ -Menge kg/ha*a	CO ₂ _{Äqu} -Menge kg/ha*a
Futtermittel	8.060	8.060
Futtermittelbereitstellung	1.190	1.523
Strom für Stall	246	283
Summe	9.495	9.866
davon im Fleisch gebunden	299	299

Für die Bereitstellung der benötigten Futtermittel sind insgesamt 0,99 ha Ackerfläche nötig, so dass sich folgendes Ergebnis für die Schweinehaltung ergibt: 2.974 kg (Summe aller CO₂-Bindungsmengen) im Schweinefleisch gebundenes CO₂_{phr} pro 10 Jahre und 0,99 ha ergeben ein Bindungspotential von 299 kg CO₂_{phr} pro Jahr und Hektar.

Pro Jahr und ha Fläche werden also durch die Schweinehaltung 299 kg CO₂ im Produkt gebunden, wobei hierfür 9.495 kg CO₂ bzw. 9.866 kg CO₂_{Äqu} entweder über Futtermittel oder über Betriebsstoffe und Betriebsmittel eingesetzt werden mussten.

9 Strukturanalyse der Land- und Forstwirtschaft als Grundlage für Potentialabschätzungen

In der Strukturanalyse der bayerischen Land- und Forstwirtschaft wird, aufbauend an die in [29] beschriebene Methodik, der Umsatz von Energie und CO₂-, CH₄- und N₂O-Emissionen sowie das CO₂-Äquivalent errechnet. Ein besonderes Augenmerk liegt hierbei auf der in den Pflanzen durch die Photosynthese gespeicherten CO₂-Menge sowie auf den durch die Veredelungswirtschaft freigesetzten Methan-Emissionen.

9.1 Strukturanalyse für die Bewirtschaftung von Feld, Acker und Wald

In der Bilanz für Feld, Acker und Wald ist die eigentliche Produktion der Land- und Forstwirtschaft enthalten. Mit dem Einsatz von Betriebsmitteln in Form von Brenn-, Kraft- und Betriebsstoffen, Strom, Dünge- und Pflanzenschutzmittel, werden aus dem Saatgut über die Photosynthese die pflanzlichen Produkte erzeugt. Diese Produkte von Feld und Acker werden entweder für die menschliche Ernährung oder aber im Wesentlichen als Futtermittel für die Veredelungswirtschaft verwendet. Das Holz als Produkt des Waldes wird entweder als Konstruktionsmaterial oder als Brennstoff verwendet.

Die Anbauflächen und absoluten Erntemengen der jeweiligen Produkte der bayerischen Land- und Forstwirtschaft für das Jahr 2000 stammen aus [40] und werden als Basis für nachfolgende Betrachtungen in der Tabelle 9-1 aufgezeigt. Zusätzlich werden noch der Wassergehalt und das Gewicht der Trockenmasse angeführt, wobei hier folgende Beziehung gilt:

Formel 9-1: Wassergehalt

$$m_{tr} = m_f \cdot (1 - w) \text{ [kg]}$$

mit m_{tr} = Trockenmasse [kg]
 m_f = Masse des feuchten Gutes [kg]
 w = Wassergehalt des feuchten Gutes [%]

Die einzelnen Elemente der Bilanz werden in den folgenden Unterkapiteln erläutert.

Im Freistaat Bayern standen neben der landwirtschaftlich genutzten Fläche im Jahr 2000 nach [45] zusätzlich noch etwa 122.000 ha Brachfläche zur Verfügung, die etwa 3,8 % der gesamten landwirtschaftlich genutzten Fläche ausmachen.

Tabelle 9-1: Anbauflächen, Erträge und Wassergehalte der pflanzlichen Produkte in Bayern im Jahr 2000

Produkt		Flächen	Ernte- menge	Wasser- gehalt	Gewicht der TM
		1.000 ha	absolut 1.000 t/a	%	1.000 t/a
Getreide	Winterweizen	467,0	3.250	14	2.795
	Sommerweizen	12,0	68	14	58
	Wintergerste	288,0	1.726	14	1.484
	Sommergerste	146,0	654	14	562
	Roggen	51,0	255	14	219
	Hafer	55,0	254	11	226
	Körnermais (einschl.CCM)	99,0	936	14	805
	Triticale	98,0	524	14	451
	gesamt	1.216,0	7.667	.	6.601
Hack- früchte	Kartoffeln	55,4	2.417	75	604
	Zuckerrüben	72,1	2.183	77	513
	gesamt	127,5	4.600	.	1.117
Öl- saaten	Raps/Rübsen	145,2	478	9	435
	Sonnenblumen	7,1	21	9	19
	gesamt	152,3	18.826	.	454
Futtermittel	Futtererbsen	10,7	36	14	31
	Ackerbohnen	2,4	9	14	8
	Wiesen	867,1	8.671	15	7.370
	Mähweiden, Weiden, Almen	256,9	6.551	77	1.507
	Streuwiesen	29,6	444	77	102
	Runkelrüben	2,0	224	85	34
	Klee, Klee gras	102,7	9.243	80	1.821
	Luzerne	4,8	495	82	89
	Silomais	296,8	11.309	68	3.619
	Stroh	*)	491	15	417
	Sonstiges Ackerfutter	16,0	617	77	142
	gesamt	1.589,1	38.089	.	15.139
Hopfen, Wein, Gemüse, Gärtnerei	Hopfen	15,6	26	80	5
	Wein	5,9	46	83	8
	Gemüse Freiland	12,0	261	90	26
	Gemüse Unterglas	0,2	.	0	0
	Spargel	1,6	7	96	0
	Gemüse	.	.	0	0
	Zierpflanzen	1,1	.	0	0
	Heil- und Gewürzpflanzen	2,0	.	0	0
	Obst	3,6	49	90	5
	Baumschule	2,5	.	0	0
	Freizeitgartenbau	80,0	.	0	0
	gesamt	124,7	388,7	0,0	44,5
gesamt pflanzl. Produkte		3.209,5	69.571	.	23.356

*) Getreideanbaufläche

9.1.1 Energieeinsatz

Für die Errechnung des Energieeinsatzes für die Bewirtschaftung von Feld, Acker und Wald werden die in **Tabelle 9-2** aufgeführten spezifischen Verbrauchswerte aus [36] verwendet.

Tabelle 9-2: Spezifischer Energieeinsatz für die Bewirtschaftung von Feld, Acker und Wald

Produkt bzw. Flächenutzung	spez. Brennstoffbedarf kWh/ha*a	spez. Strombedarf kWh/ha*a	spez. Kraftstoffbedarf l/ha
Getreide	10,2	6,2	94,5
Mais	0,0	90,4	128,1
Hackfrüchte	0,0	0,0	225,6
Weiden	0,0	0,0	32,1
Wiesen	0,0	9,4	89,6

Das daraus resultierende CO₂-Äquivalent lässt sich für den Brennstoff-, Strom- und Treibstoffbedarf nach folgender Formel errechnen:

Formel 9-2: Berechnung des CO₂-Äquivalents beim Energieeinsatz

$$m_{\text{CO}_2\text{Äqu}} = \sum_{i=1}^{\text{EA}} e_i * \text{GWP}_i * \sum_{j=1}^{\text{Prod}} w_{\text{BS(el, TS),j}} * A_{\text{Prod},j} \quad [\text{kg}_{\text{CO}_2\text{Äqu}}/\text{a}]$$

mit: $m_{\text{CO}_2\text{Äqu}} = \text{CO}_2\text{-Äquivalent} \quad [\text{kg}_{\text{CO}_2\text{Äqu}}/\text{a}]$

$e_i = \text{spezifischer Emissionsfaktor für die jeweilige Emissionsart} \quad [\text{g}/\text{kWh} \text{ oder } \text{mg}/\text{kWh}]$

$\text{GWP}_i = \text{Treibhauspotential für die jeweilige Emissionsart} \quad [-]$

$w_{\text{BS(el, TS),j}} = \text{spez. Brennstoff-, Strom- oder Treibstoffbedarf des jeweiligen Produktes} \quad [\text{kWh}/\text{ha}]$

$A_{\text{Prod},j} = \text{Anbaufläche des jeweiligen Produktes} \quad [\text{ha}/\text{a}]$

EA = Emissionsart (CO₂, CH₄ oder N₂O)

Prod = Produktart

Brennstoffe

Beim Brennstoffbedarf kann zwischen den landwirtschaftlichen bzw. forstwirtschaftlichen Haushalten und den Wirtschaftsbereichen bzw. den Produktionsstätten unterschieden werden. In der Regel besitzt das Anwesen entweder einen Heizöltank oder einen Gasanschluss, so dass auch bei Kenntnis des gesamten Brennstoffbedarfs eine Aufteilung auf Heizöl und Erdgas nur über eine grobe Abschätzung erfolgen kann. Gänzlich unberücksichtigt bleibt jedoch der Anteil von biogenen Brennstoffen am gesamten Brennstoffbedarf, da gerade in ländlichen Gegenden viel Wald und damit viel Restholz auf den Höfen vorhanden ist.

Aus diesem Grunde erfolgt die Abschätzung des Brennstoffbedarfs für Ackerbau über spezifische Verbrauchswerte (Tabelle 9-2). Demnach fällt nur für den Anbau von Getreide ein spezifischer Brennstoffbedarf in Höhe von 0,01 MWh/ha und Jahr an, der zusammen mit den Anbauflächen aus Tabelle 9-1 auf den Gesamtbedarf hochgerechnet wird:

Der gesamte jährliche Brennstoffbedarf für Ackerbau beträgt demnach 12,8 GWh, davon sind 98 % oder 12,5 GWh Heizöl und die restlichen 2 % (0,3 GWh) Erdgas. Mit den spezifischen Emissionsfak-

toren ergibt sich eine gesamte jährliche CO₂-Menge von 3.947 t, wovon 3.889 t durch Heizöl und 58,5 t durch Erdgas verursacht werden. Hinzu kommen noch insgesamt 4,45 t CH₄ und 0,04 t N₂O, so dass sich das CO₂-Äquivalent der Brennstoffe zu 4.053 t errechnet.

Strombedarf

Ein landwirtschaftliches Anwesen besitzt in der Regel nur einen Anschluss an die öffentliche Stromversorgung mit nur einem Zähler. Eine Aufteilung des Stromverbrauchs auf den privaten Haushalt und die Produktionsstätten ist in der Regel nicht möglich.

Um eine Abschätzung für die in der Land- und Forstwirtschaft verbrauchte Menge an Strom zu erhalten, werden die in Tabelle 9-2 angeführten spezifischen Verbrauchsdaten für Ackerbau mit Hilfe der Anbaufläche auf die Absolutwerte aus Tabelle 9-1 hochgerechnet.

Insgesamt ergibt sich für den Ackerbau ein jährlicher Strombedarf von 46,0 GWh, davon entfallen rund 35,8 GWh, das sind etwa 78 %, auf den Mais und die restlichen 17 % bzw. 7,8 GWh nahezu ausschließlich auf Getreide. Mit diesem Strombedarf sind CO₂-Emissionen in Höhe von jährlich 7.739 t verbunden. Zusätzlich werden pro Jahr 72,7 t CH₄ und 1,1 t N₂O freigesetzt, wodurch sich ein CO₂-Äquivalent von 9.127 t ergibt.

Treib- und Schmierstoffe

Der Verbrauch an Kraftstoffen lässt sich mit den Angaben aus Tabelle 9-2 über spezifische Werte für Ackerbau und Viehzucht errechnen. Der gesamte Treibstoffverbrauch der bayerischen Land- und Forstwirtschaft lässt sich über den anerkannten Dieserverbrauch und [36] abschätzen. Demnach umfasst der Dieserverbrauch etwa 90 % des gesamten Treibstoffverbrauches, die restlichen 10 % sind Benzin. Hinzu kommen noch Schmiermittel mit einem Verhältnis 5,5 zu 100 gegenüber den gesamten Treibstoffen.

Im Jahr 2000 wurden insgesamt etwa 465,6 Millionen Liter Diesel und 60,5 Millionen Liter Benzin sowie etwas mehr als 28,8 Millionen Liter Schmiermittel in der Land- und Forstwirtschaft verbraucht. Für Ackerbau und Forstwirtschaft ergibt sich hieraus ein Treib- und Schmierstoffverbrauch von 4,5 TWh, an dem der Diesel einen Anteil von 84,8 % (3,85 TWh) und Benzin einen Anteil von 9,4 % (0,43 TWh) hat. Die restlichen 5,8 % bzw. 0,26 TWh stammen von Schmiermitteln.

Insgesamt entstehen hierdurch 1,3 Mio. t CO₂, die zu 87,9 % auf Diesel und zu 10,6 % auf Benzin entfallen. Bei den Schmiermitteln wird angenommen, dass 20 % der eingesetzten Menge als Schmiermittel in Zweitaktmotoren (Kettensäge o.ä.) verbrannt und die restlichen 80 % recycelt werden, so dass sich für die Schmiermittel Emissionen von 18.199 t CO₂ pro Jahr ergeben. Mit den 1.551,5t CH₄ und den 224,9 t N₂O pro Jahr errechnet sich hieraus ein CO₂-Äquivalent von 1,4 Mio. t.

9.1.2 Maschinen und Geräte

Für die Maschinen und Geräte werden mangels detaillierter Zahlenwerte für Bayern die Anzahl der Neuzulassungen von Traktoren, Zugmaschinen und sonstigen Arbeitsgeräten aus [37] ermittelt. Die Neuanschaffung von Arbeitsgeräten und Anhängern beruhen auf eigenen Hochrechnungen.

In der bayerischen Landwirtschaft wurden 2000 5.332 Schlepper mit einem mittleren Gewicht von 5.300 kg pro Schlepper [39] neuzugelassen. Damit verbunden sind für die Herstellung und die spätere Entsorgung spezifische Emissionen von 3.798 g CO₂ pro kg Schleppergewicht, so dass sich die

CO₂-Menge pro Schlepper zu 20.128 kg errechnet. Für den Ackerbau und die Forstwirtschaft wird ein Anteil von 2/3 an allen neuzugelassenen Schlepper - also 3.555 Stück- angesetzt.

Die Arbeitsgeräte und Anhänger lassen sich in die Gruppen Bodenbearbeitungsgeräte, Streu-, Pflanz- und Erntegeräte und selbstfahrende Erntemaschinen einteilen. Für den Ackerbau und die Forstwirtschaft wird ein Anteil von 60 % an allen neuen Arbeitsgeräten und Anhängern angesetzt. Ähnlich wie bei den Schleppern werden die Emissionen über die Stückzahl, das Gewicht und die spezifischen Emissionen errechnet.

Die Herstellung der neuen Maschinen und Geräte ist mit 0,2 Mio. t CO₂, 37 t CH₄ und 1 t N₂O, insgesamt 197.881 t CO₂-Äquivalent verbunden.

9.1.3 Düngemittel

Düngemittel spielen in der Landwirtschaft eine zentrale Rolle. Für eine pflanzen- und umweltgerechte Düngung sind die Art des Düngers, die Menge und der Zeitpunkt der Düngung von entscheidender Bedeutung, zumal auch die im Boden verfügbaren Nährstoffe berücksichtigt werden müssen.

Für die Untersuchung werden die in [40] pro landwirtschaftlich genutzter Fläche angegebenen durchschnittlichen Düngermengen und die spezifischen Gesamtemissionen für die Düngemittelherstellung aus [39] (**Tabelle 9-3**) als Eingangsgrößen für die Berechnung verwendet.

Tabelle 9-3: Durchschnittliche spezifische Düngemittelmenge und spezifische Emissionen der Düngemittelherstellung

Düngerart	spez. Düngermenge kg/ha	spezifische Emissionen bei der Düngemittelherstellung		
		CO ₂ kg/kg	CH ₄ g/kg	N ₂ O*) g/kg
Stickstoff	89,0	3,1	4,3	14,4
Phosphat	24,0	1,0	1106,3	0,0
Kali	32,0	0,5	23,5	0,0
Kalk	104,0	0,2	10,0	0,0

*) inklusive der N₂O-Freisetzung durch die Düngung

Die mit der Herstellung von Düngemitteln verbundenen Emissionen fallen zwar in der Düngemittelindustrie an, müssen jedoch aufgrund des Einsatzes in der Land- und Forstwirtschaft auch hier bilanziert werden. Je nach Art des Düngers fallen unterschiedliche spezifische Emissionen an, die über die absoluten Mengen die gesamten Emissionen ergeben. Beim Stickstoff-Dünger werden im Boden zusätzlich etwa 2 kg N₂O produziert, die in der Tabelle 9-3 bereits enthalten sind.

Eine Multiplikation der spezifischen Düngemittelmengen mit der landwirtschaftlich genutzten Fläche ergibt die absolute Menge an Mineraldünger für 2000 in Höhe von 0,78 Mio. t, welche für das CO₂-Äquivalent mit dem spezifischen Emissionsfaktor aus Tabelle 9-3 und dem jeweiligen GWP nach folgender Rechenvorschrift ermittelt wird:

Formel 9-3: Berechnung des CO₂-Äquivalentes durch Düngereinsatz

$$m_{\text{CO}_2\text{Äqu}} = \sum_{i=1}^{\text{EA}} e_i * \text{GWP}_i * \sum_{j=1}^{\text{DM}} A_{\text{LF},j} * m_j \quad [\text{kg}_{\text{CO}_2\text{Äqu}}/\text{a}]$$

mit: $m_{\text{CO}_2\text{Äqu}}$ = CO₂-Äquivalent [kg_{CO₂Äqu}/a]

e_i = spezifischer Emissionsfaktor für die jeweilige Emissionsart [kg/kg_{DM} oder g/kg_{DM}]

GWP_i = Treibhauspotential für die jeweilige Emissionsart [-]

$A_{\text{LF},j}$ = gesamte landwirtschaftlich genutzte Fläche [ha/a]

m_j = spezifische Düngemittelmenge des jeweiligen Düngers [kg_{DM}/ha]

EA = Emissionsart (CO₂, CH₄ oder N₂O)

DM = Düngemittel (Stickstoff, Phosphat, Kali oder Kalk).

Für das Jahr 2000 ergibt sich aus der Herstellung der Düngemittel ein CO₂-Äquivalent von 2,3 Mio. t, die sich aus 1 Mio. t CO₂, 1.237 t CH₄ und 3.839 t N₂O zusammensetzen.

9.1.4 Pflanzenschutzmittel

Neben den Düngemitteln spielen die Pflanzenschutzmittel (PSM) heute eine wichtige Rolle in der Landwirtschaft, weil nur durch sie hohe und qualitativ einwandfreie Erträge erreicht werden können. Art und Menge der einzusetzenden PSM (**Tabelle 9-4**) hängt nicht nur von der Pflanzenart ab, sondern vor allem vom Entwicklungsstadium. Meist werden Kombinationen von verschiedenen PSM verwendet, jedoch unterscheidet man im allgemeinen nach Herbiziden (Unkrautvernichtungsmittel), Fungiziden (Mittel gegen Pilze und Bakterien), Insektiziden (Insektenvernichtungsmittel) und sonstigen PSM (Wachstumsregler, ...).

Verrechnet man die absoluten Mengen an PSM für die wichtigsten Kulturen mit den zugehörigen spezifischen CO₂-Emissionen der Herstellung aus [39] (Tabelle 9-4) nach:

Formel 9-4: Berechnung des CO₂-Äquivalentes durch PSM-Einsatz

$$m_{\text{CO}_2\text{Äqu}} = \sum_{i=1}^{\text{EA}} e_i * \text{GWP}_i * \sum_{j=1}^{\text{PSM}} \sum_{k=1}^{\text{Prod}} A_k * m_{k,j} \quad [\text{kg}_{\text{CO}_2\text{Äqu}}/\text{a}]$$

mit: $m_{\text{CO}_2\text{Äqu}}$ = CO₂-Äquivalent [kg_{CO₂Äqu}/a]

e_i = spezifischer Emissionsfaktor für die jeweilige Emissionsart [g/kg_{PSM}]

GWP_i = Treibhauspotential für die jeweilige Emissionsart [-]

A_k = Anbaufläche des jeweiligen Produktes [ha/a]

$m_{k,j}$ = spezifische, auf das jeweilige Produkt abgestimmte PSM-Menge [kg/ha]

EA = Emissionsart (CO₂, CH₄ oder N₂O)

PSM = PSM (Herbizide, Fungizide, Insektizide oder Wachstumsregler/ Sonstige)

Prod = pflanzliche Produkte,

so ergeben sich für die Herstellung CO₂-Emissionen in Höhe von 0,16 Mio. t und Methan-Emissionen von 267 t. Zusammen mit den 55 t N₂O-Freisetzung ergibt sich ein CO₂-Äquivalent von 0,18 Mio. t.

Tabelle 9-4: Spezifische Einsatzmengen in Bayern und spezifische Emissionen bei der PSM-Herstellung

	Herbizide	Fungizide	Insektzide	Wachstumsregler/ Sonstige
	Spezifische Einsatzmengen			
	kg/ha			
Winterweizen	2,0	1,5	1,0	1,0
Winterroggen	2,0	0,0	1,0	1,0
Winterraps	2,5	1,2	2,0	0,0
Triticale	2,0	1,5	1,0	1,0
Wintergerste	2,0	1,5	1,0	1,0
Kartoffeln	1,0	0,7	0,8	3,0
Zuckerrüben	1,5	1,0	1,0	2,0
Körnermais	1,0	0,0	0,0	0,5
Silomais	1,5	0,0	0,0	0,5
Hafer	1,0	0,0	0,0	0,5
Sommergerste	1,5	1,0	0,0	0,0
Körnererbsen	2,5	0,4	0,7	0,0
Ackerbohnen	2,0	0,4	1,0	0,0
	spezifische Emissionen bei der PSM-Herstellung			
	g/kg			
CO ₂	24.863,5	14.774,3	22.629,6	14.879,2
CH ₄	39,5	28,9	40,0	27,2
N ₂ O	10,1	3,8	7,6	4,4

9.1.5 Saatgut

Im Gegensatz zu früher wird das Saatgut heute nicht mehr aus dem Ertrag des Vorjahres gewonnen, sondern jedes Jahr von Saatgutherstellern über den Agrarhandel bezogen. Aus diesem Grund werden die Saatmittel hier separat betrachtet. Bei der Bilanzierung müssen nicht nur das im Saatgut gebundene CO₂, sondern auch die bei der Herstellung, der Verpackung und beim Transport anfallenden CO₂-Emissionen berücksichtigt werden (**Tabelle 9-5** aus [39]).

Grundlage für die Berechnung bilden auch hier die Anbauflächen aus Tabelle 9-1, die mit den spezifischen Saatgutmengen aus Tabelle 9-5 die absoluten Saatgutmengen ergeben.

Für die absolute Menge an CO₂-Emissionen durch Saatgut werden die jeweiligen Mengen mit den spezifisch gebundenen und den spezifischen, herstellungsbedingten CO₂-Emissionen multipliziert, wobei folgender Zusammenhang gilt:

Formel 9-5: Berechnung des CO₂-Äquivalentes durch Saatgut

$$m_{\text{CO}_2\text{Äqu}} = \sum_{i=1}^{\text{EA}} e_i * \text{GWP}_i * \sum_{j=1}^{\text{Prod}} A_j * (m_j + m_{\text{gesp } i}) \quad [\text{kg}_{\text{CO}_2\text{Äqu}}/\text{a}]$$

mit: $m_{\text{CO}_2\text{Äqu}} = \text{CO}_2\text{-Äquivalent [kg}_{\text{CO}_2\text{Äqu}}]$
 $e_i = \text{spezifischer Emissionsfaktor für die jeweilige Emissionsart [g/kg der mg/kg]}$
 $\text{GWP}_i = \text{Treibhauspotential für die jeweilige Emissionsart [-]}$
 $A_j = \text{Anbaufläche des jeweiligen Produktes [ha]}$
 $m_j = \text{spezifische Saatgutmenge [kg/ha]}$
 $m_{\text{gesp}, i} = \text{gespeicherte Emissionsmenge (nur CO}_2\text{) [kg]}$
 $\text{EA} = \text{Emissionsart (CO}_2\text{, CH}_4\text{ oder N}_2\text{O)}$
 $\text{Prod} = \text{pflanzliche Produkte.}$

Tabelle 9-5: spezifische Saatgutmenge in Bayern, darin gebundene CO₂_{phr}-Menge und spez. Emissionen bei der Saatgutherstellung

	spez. Saatgutmenge kg/ha	im Saatgut gebundenes CO ₂ kg/ha	spez. Emissionen bei der Saatgutherstellung		
			CO ₂ kg/ha	CH ₄ g/ha	N ₂ O g/ha
Winterweizen	170	245,0	71,0	16,3	0,0
Winterroggen	150	221,8	62,6	14,4	0,0
Winterraps	6	8,2	1,2	0,3	0,0
Triticale	150	219,3	66,5	15,3	0,0
Wintergerste	150	205,8	66,5	15,3	0,0
Kartoffeln	2.400	884,4	271,8	59,2	0,0
Zuckerrüben	6	2,3	42,7	10,0	0,0
Körnermais	18	36,3	23,4	5,5	0,0
Silomais	18	28,4	23,4	5,5	0,0
Hafer	104	143,0	43,4	10,0	0,0
Sommergerste	150	205,8	66,5	15,3	0,0
Körnererbsen	200	105,6	41,5	9,4	0,0
Ackerbohnen	233	88,6	48,3	10,9	0,0

Für Bayern ergeben sich für das Bilanzjahr 0,4 Mio. t CO₂ inklusive CO₂_{phr}, und 23,4 t CH₄, Lachgas-Emissionen können nicht ausgewiesen werden. Das gesamte CO₂-Äquivalent beträgt somit 0,4 Mio. t.

9.1.6 Bindung in Holz durch Forstwirtschaft

Die Bindung von Kohlenstoff in Holz erfolgt über die gesamte Lebensdauer des Baumes bis zur Ernte desselben. Beginnend vom kleinen Sämling bis hin zum ausgewachsenen Baum werden große Mengen an Kohlendioxid absorbiert und durch Photosynthese in Kohlenhydrate und Sauerstoff zerlegt. Diese Kohlenhydrate werden dann als Zellulose, Lignin, Holzpolyosen und Hemizellulose in der Pflanze eingelagert und bilden zusammen das Holz.

Ausgehend von den Einschlagszahlen für das Wald-Wirtschaftsjahr 1999/ 2000 [41], inklusive dem Windwurf durch den Weihnachtsorkan Lothar, dem Wassergehalt und dem Kohlenstoffanteil der j-

weiligen Holzsorte [39] wird mit nachfolgender Berechnungsvorschrift die dem eingeschlagenen Holz zurechenbare $\text{CO}_{2\text{phr}}$ -Menge bestimmt.

Formel 9-6: Berechnung der $\text{CO}_{2\text{phr}}$ -Bindung durch Forstwirtschaft

$$m_{\text{CO}_{2\text{phr}}} = \sum_{i=1}^{\text{HA}} V_{\text{HA}} * \rho_i * (1 - w_i) * a_{\text{C},i} * 44/12 \quad [\text{kg}_{\text{CO}_2\text{Äqu}}/\text{a}]$$

mit: m_{CO_2} = $\text{CO}_{2\text{phr}}$ -Menge [$\text{kg}_{\text{CO}_2\text{Äqu}}$]

V_{HA} = Einschlag der jeweiligen Holzart [m^3]

ρ_i = spezifischer Dichte der jeweiligen Holzart [kg/m^3]

w_i = Wassergehalt der jeweiligen Holzart [%]

$a_{\text{C},i}$ = Kohlenstoffgehalt der jeweiligen Holzart [%]

44/12 = anrechenbare CO_2 -Menge pro Kohlenstoffmenge [$\text{kg}_{\text{CO}_2}/\text{kg}$]

HA = Holzart

Tabelle 9-6: Erntemenge und $\text{CO}_{2\text{phr}}$ -Bindung in der Forstwirtschaft in Bayern für das Jahr 2000

Holzart	Einschlag gesamt m^3	Ernte- menge t	Wasser- gehalt -	Gewicht der TM t	C-Gehalt TM -	$\text{CO}_{2\text{phr}}$ - Bindung t_{phr}
Nadelholz	8.431.000	6.630.415	50,0%	3.743.090	51%	6.983.332
davon						
Fichte, Tanne, Douglasie	6.959.000	5.984.740	50,0%	2.992.370	50%	5.518.928
Kiefer, Lärche, Strobe	1.472.000	1.501.440	50,0%	750.720	53%	1.464.404
Laubholz	1.580.320	1.580.320	45,0%	869.176	49%	1.553.309
davon						
Buche, Sonst.Laubholz	1.002.000	1.362.720	45,0%	749.496	48%	1.305.372
Eiche, Roteiche	160.000	217.600	45,0%	119.680	57%	247.937
Insgesamt	9.593.000	8.210.735	49,4%	4.612.266	50%	8.536.641

Unberücksichtigt bleiben hier die Äste, die Rinde und die Wipfel bzw. Schwachhölzer, da diese entweder im Wald verbleiben oder für andere Zwecke innerhalb der Land- und Forstwirtschaft genutzt werden.

Von den insgesamt 8,5 Mio. t $\text{CO}_{2\text{phr}}$ werden etwa 82 % oder 7,0 Mio. t in Nadelhölzern und 18 % oder 1,5 Mio. t in Laubhölzern gebunden.

9.1.7 Bindung in pflanzlichen Produkten

Die Bindung von CO_2 in pflanzlichen Produkten erfolgt über den in Kapitel 2.5 beschriebenen Vorgang der Photosynthese. Während des Wachstums bindet die Pflanze CO_2 als Kohlenstoff nicht nur in den über der Erde liegenden Pflanzenteilen, sondern auch in ihren Wurzeln und in dem sie umgebenden Boden. Aus der Erntemenge und Wassergehalt des jeweiligen Produktes (Tabelle 9-1) wird die Trockenmasse der Erntemenge berechnet, woraus dann die Menge des gebundenen Kohlenstoffs ermittelt wird (**Tabelle 9-7**).

Tabelle 9-7: CO₂_{phr}-Bindung in den pflanzlichen Produkten

Produkt	Gewicht der TM		C-Gehalt TM	CO ₂ _{phr} -Bindung		
	spez. dt/ha	absolut 1.000 t	%	spez. dt/ha	absolut 1.000 t	
Getreide	Winterweizen	59,9	2.795	43,6	96	4.468
	Sommerweizen	50,0	58	43,6	80	93
	Wintergerste	51,5	1.484	46,9	89	2.553
	Sommergerste	38,4	562	46,9	66	967
	Roggen	43,3	219	45,7	72	367
	Hafer	41,4	226	44,0	67	365
	Körnermais (einschl.CCM)	81,0	805	43,6	130	1.287
	Triticale	48,2	451	43,5	77	719
gesamt	.	6.601	.	.	10.819	
Hackfrüchte	Kartoffeln	109,0	604	40,2	161	891
	Zuckerrüben	169,0	513	43,9	272	826
	gesamt	.	1.117	.	.	1.716
Ölsaaten	Raps/Rübsen	29,9	435	60,5	66,4	965
	Sonnenblumen	26,5	19	65,8	63,9	45
	gesamt	.	454	.	.	1.010
Futtermittel	Futtererbsen	28,7	31	36,1	38,0	41
	Ackerbohnen	31,9	8	34,2	40,0	9
	Wiesen	85,0	7.370	45,1	140,6	12.188
	Mähweiden, Weiden, Almen	69,0	1.507	45,1	114,1	2.492
	Streuwiesen	69,0	102	45,1	114,1	169
	Runkelrüben	165,0	34	39,0	236,3	48
	Klee, Klee gras	177,3	1.821	46,1	299,7	3.078
	Luzerne	184,1	89	45,0	303,7	147
	Silomais	121,9	3.619	45,0	201,2	5.971
	Stroh	3,4	417	42,5	5,3	650
	Sonstiges Ackerfutter	88,8	142	45,1	146,9	235
	gesamt	.	15.139	.	.	25.028
Hopfen, Wein, Gemüse, Gärtnerei	Hopfen	3,3	5	45,0	5,5	8,6
	Wein	0,0	8	52,9	0,0	15,7
	Gemüse Freiland	0,0	26	3,5	0,0	3,4
	Gemüse Unterglas	0,0	0	0,0	0,0	0,0
	Spargel	1,6	0	1,8	0,1	0,0
	Gemüse	0,0	0	0,0	0,0	0,0
	Zierpflanzen	0,0	0	0,0	0,0	0,0
	Heil- und Gewürzpflanzen	0,0	0	0,0	0,0	0,0
	Obst	0,0	5	5,8	0,0	1,0
	Baumschule	0,0	0	0,0	0,0	0,0
	Freizeitgartenbau	0,0	0	0,0	0,0	0,0
	gesamt	0,0	44,5	0,0	5,6	28,7
gesamt pflanzl. Produkte	.	23.356	.	.	38.602	

Bei der Ernte werden aber nur bestimmte Pflanzenteile vom Feld geholt, der Rest verbleibt dort und zersetzt sich während des Winters. Dieser auf dem Feld verbleibende Anteil trägt nicht zur CO₂-

Bindung bei, da das in ihm als Kohlenstoff aus der Atmosphäre entnommene $\text{CO}_{2\text{phr}}$ und gespeicherte während des Zersetzungsvorganges emittiert und dem Kreislauf wieder zugeführt wird. Betrachtet werden nur die vom Feld abtransportierten Produkte, wie zum Beispiel die Getreidekörner, jedoch nicht die Nebenprodukte wie das Stroh bei der Getreideerzeugung. Es wird hier davon ausgegangen, dass zwar das Stroh vom Feld geholt wird, der größte Teil jedoch innerhalb des "Bilanzraumes Hof" als Einstreu weiterverwendet und schließlich wieder auf dem Feld ausgebracht wird. Der übrige Teil des Strohs verlässt definitionsgemäß den Bilanzraum und geht als Futtermittel in die Tierhaltung ein. Ein ähnlicher Rückfluss besteht beim Heu- bzw. Graseinsatz für die Tierhaltung; beide verlassen zwar den Bilanzraum als $\text{CO}_{2\text{phr}}$ -Binder, fließen aber als Tierfutter wieder ein.

In den Futtererbsen und Ackerbohnen werden zusätzlich noch 4,0 kg N_2O pro ha und Jahr gebunden, was über die Anbaufläche eine Summe von insgesamt 52,4 t gebundenem N_2O ergibt. Somit errechnet sich das in den pflanzlichen Produkten gebundene CO_2 -Äquivalent zu 38,6 Mio. t.

9.1.8 Ergebnis der Strukturanalyse für Feld, Acker und Wald

Wie man aus **Tabelle 9-8** erkennt, besitzen die Kraft- und Betriebsstoffe mit fast 42 % den größten Anteil an den CO_2 -Emissionen, gefolgt von den mineralischen Düngemitteln mit 33 %. Mit etwas größerem Abstand folgen Saatgut, Maschinen und Geräte, Pflanzenschutzmittel, Strom und schließlich die Brennstoffe.

Beim CO_2 -Äquivalent besitzen die Düngemittel mit fast 51 % den größten Anteil, gefolgt von den Kraft- und Betriebsstoffen mit 31,3 %. Die restlichen Bilanzposten bleiben nahezu unverändert.

Tabelle 9-8: Inputbilanz von Feld-, Acker- und Waldbewirtschaftung in Bayern für 2000

Art	CO_2 -Emissionen bzw. $\text{CO}_{2\text{phr}}$ -Input		$\text{CO}_{2\text{Äqu}}$ -Emissionen bzw. $\text{CO}_{2\text{Äqu-phr}}$ -Input	
	absolut Mio. t/a	Anteil %	absolut Mio. t/a	Anteil %
Brennstoffe	0,00	0,13	0,00	0,09
Strom	0,01	0,25	0,01	0,22
Kraft-/Betriebsstoffe	1,29	41,97	1,40	31,32
Düngemittel	1,01	32,87	2,27	50,74
Pflanzenschutzmittel	0,16	5,06	0,18	4,00
Saatgut	0,41	13,33	0,41	9,20
Maschinen/ Geräte	0,20	6,39	0,20	4,43
Summe	3,08	100,00	4,47	100,00

Diesen Emissionen steht die $\text{CO}_{2\text{phr}}$ -Bindung im Forst durch Holzeinschlag und den geernteten pflanzlichen Produkten gegenüber (**Tabelle 9-9**).

Man erkennt, dass die pflanzlichen Produkte etwa zu 82 % und der Holzeinschlag etwa zu 18 % an der gesamten Bindungsmenge beteiligt sind. Beim CO_2 -Äquivalent kommt ein unwesentlicher Teil aus der N_2O -Bindung der Leguminosen hinzu.

Im direkten Vergleich zwischen CO_2 -Emissionen und $\text{CO}_{2\text{phr}}$ -Bindung erkennt man, dass mit dem Einsatz von einem kg CO_2 über die Vegetationsperiode hinweg rund 14,2 kg $\text{CO}_{2\text{phr}}$ bzw. 9,48 kg

CO₂Äqu-phr gebunden werden, aber in pflanzlichen Produkten auch wieder in relativ kurzer Zeit "entbunden" werden.

Tabelle 9-9: Output-/Bindungsbilanz der Feld-, Acker- und Waldbewirtschaftung in Bayern für das Jahr 2000

Art	CO ₂ phr-Bindung		CO ₂ Äqu-phr-Bindung	
	absolut t _{phr} /a	Anteil %	absolut t _{phr} /a	Anteil %
Forst	8,54	18,11	8,54	18,10
pflanzl. Produkte	38,60	81,89	38,60	81,86
Leguminosen	.	.	0,02	0,04
Summe	47,14	100,00	47,16	100,00

9.2 Struktur der Veredelungswirtschaft

Im Jahr 2000 gab es nach [28] insgesamt die in **Tabelle 9-10** aufgeführten Anzahl der einzelnen Tierarten, welche üblicherweise nicht in absoluten Zahlen, sondern als Großvieheinheiten angegeben werden. Eine Großvieheinheit GVE entspricht in etwa einem Pferd.

Tabelle 9-10: Anzahl der Tiere und zugehörige Großvieheinheiten in Bayern im Jahr 2000

Tierart	Anzahl Tiere Stück	Anzahl GVE Stück
Milchkühe	1.416.000	1.699.200
Stärken und Fersen	640.250	384.150
Jungvieh	1.280.500	384.150
Mastkälber, -rinder	640.250	448.175
Zuchtsauen	423.593	211.797
Mastschweine	1.448.688	231.790
Aufzuchtferkel	1.893.461	56.804
Geflügel	9.223.138	55.339
Pferde	120.000	120.000
Schafe/Ziegen	483.689	48.369
Summe	17.569.569	3.639.773

9.2.1 Energieeinsatz für die Veredelungswirtschaft

Für die Errechnung des Energieeinsatzes für die Veredelungswirtschaft werden die in **Tabelle 9-11** aufgeführten spezifischen Verbrauchswerte aus [36] verwendet. Die Berechnung des Energieeinsatzes erfolgt hierbei analog zu den in Kapitel 9.1.1 aufgezeigten Berechnungsvorschriften, jedoch werden hier anstelle der Anbauflächen die Bestandszahlen der Tiere eingesetzt.

Tabelle 9-11: Spezifischer Energieeinsatz für die Veredelungswirtschaft in Bayern im Jahr 2000

Tierart	spez. Brennstoffbedarf kWh/a*Stück	spez. Strombedarf kWh/a*Stück	spez. Kraftstoffbedarf l/Stück
Mastschweine	3,5	65,7	4,5
Zuchtsauen	3,5	155,4	5,4
Aufzuchtferkel	94,5	4,1	0,5
Milchkühe	216,3	297,9	23,2
Mastkälber/-rinder	113,1	36,9	8,5
Stärken und Fersen	0,0	20,8	16,7
Jungvieh	239,1	33,9	16,4
Legehennen	0,0	16,0	0,1
Masthähnchen	0,0	0,9	0,1
sonst. Geflügel	0,0	1,9	0,1

Brennstoffe

Die Abschätzung des Brennstoffbedarfs für die bayerische Veredelungswirtschaft erfolgt über die in 9.1.1 aufgeführte Vorgehensweise mittels der spezifischen Verbrauchswerte aus Tabelle 9-11, die über den Tierbestand aus Tabelle 9-10 auf den Gesamtbedarf hochgerechnet werden.

Insgesamt werden 870.434 MWh an Brennstoffen für die Veredelungswirtschaft benötigt, verbunden sind damit CO₂-Emissionen in Höhe von 0,27 Mio. t, 302,0 t CH₄ und 2,7 t N₂O, insgesamt also 0,28 Mio. t.

Strombedarf

Um eine Abschätzung für die in den Veredelungsbetrieben verbrauchte Menge an Strom zu erhalten, werden die in Tabelle 9-11 angeführten spezifischen Verbräuche für die Viehzucht mit Hilfe der Tierbestandszahlen aus Tabelle 9-10 auf die Absolutwerte hochgerechnet.

Insgesamt ergibt sich ein Strombedarf von 0,75 TWh, davon entfallen rund 0,42 TWh, das sind etwa 56,6 %, auf die Milchkuhhaltung. Die restlichen 43,4 % bzw. 0,32 TWh werden im wesentlichen für Mastschweinehaltung (0,09 TWh), Zuchtsauen (0,07 TWh), Legehennenhaltung (0,07 TWh) und Junggrindvieh (0,04 TWh) benötigt.

Insgesamt fallen durch den Strombezug 0,13 Mio. t an CO₂ an, 1.177 t CH₄ und 18,4 t N₂O oder insgesamt 0,16 Mio. t CO₂-Äquivalent an, die sich entsprechend dem Anteil an der Gesamtstrommenge auf die einzelnen Sparten unterteilen lassen.

Treib- und Schmierstoffe

Der Verbrauch an Kraftstoffen lässt sich, analog zu 9.1.1, mit den Angaben aus Tabelle 9-11 für die spezifischen Werte für die Veredelungswirtschaft und den Werten aus Tabelle 9-10 errechnen.

Für die Veredelungsbetriebe ergibt sich hieraus ein Treib- und Schmierstoffverbrauch von 0,95 TWh, an dem der Diesel einen Anteil von 84,8 % (0,8 TWh) und Benzin einen Anteil von 9,4 % (0,09 TWh) hat. Die restlichen 5,8 % bzw. 0,06 TWh stammen von Schmiermitteln.

Mit diesem Verbrauch sind Emissionen in Höhe von 0,27 Mio. t CO₂, die zu 87,9 % aus Diesel und zu 10,4 % aus Benzin entstammen, verbunden. Bei den Schmiermitteln wird angenommen, dass 20 % der eingesetzten Menge als Schmiermittel in Zweitaktmotoren verbrannt und die restlichen 80 % recycelt werden, so dass sich für die Schmiermittel Emissionen von 3.798 t CO₂ pro Jahr ergeben.

Mit den gesamten CH₄-Emissionen in Höhe von 323,8 t und einer N₂O-Menge von 47,9 t ergibt sich hieraus ein CO₂-Äquivalent von 0,3 Mio. t.

9.2.2 Maschinen und Geräte

Die Maschinen und Geräte lassen sich entsprechend 9.1.2 aufteilen in Arbeitsgeräte und Anhänger. Für die Veredelungsbetriebe wird ein Anteil von 1/3 aller neuen Schlepper angesetzt; die damit verbundenen herstellungsbedingten Emissionen betragen 0,03 Mio. t CO₂.

Für die Veredelungswirtschaft wird ein Anteil von 2/5 aller neuen Arbeitsgeräte und Anhänger angesetzt. Ähnlich wie bei den Schleppern werden die Emissionen über die Stückzahl, das Gewicht und die spezifischen Emissionen errechnet, als Ergebnis ergibt sich zu 0,08 Mio. t CO₂. Für das CO₂-Äquivalent in Höhe von 0,12 Mio. t werden zusätzlich noch die Methan-Emissionen von insgesamt 25 t und die Lachgas-Emissionen von einer Tonne berücksichtigt.

9.2.3 Futtermittel

Die Futtermittel in der Tierhaltung bilden den größten und aufwendungsintensivsten Punkt in der Bilanzierung der Emissionen der bayerischen Land- und Forstwirtschaft. Mit Hilfe von [42] werden aus den absoluten Mengenangaben für die gesamte Bundesrepublik ein durchschnittlicher Futtermittelmix entwickelt, der anschließend auf Bayern übertragen wird. Darin ist das Verbot zur Verfütterung von Tiermehl und anderen Maßnahmen im Zuge der BSE-Krise noch nicht berücksichtigt, da noch keine aktuelleren Zahlen vorliegen.

Zusammen mit der Angabe spezifischer CO₂_{phr}-Bindungsmengen im Futtermittel aus [39] und mit den Tierbestandszahlen aus Tabelle 9-10 kann über die in Kapitel 2.5 angeführte Methodik daraus die absolute Mengen der CO₂_{phr}-Bindung der Futtermittel errechnet werden (**Tabelle 9-12**).

Den größten Anteil an der Futtermittelmenge haben erwartungsgemäß die Rinder, mit großem Abstand gefolgt von den Schweinen und mit weiterem Abstand von den restlichen Tierarten.

Insgesamt werden 32,6 Mio. t CO₂_{phr} die Tiere verfüttert, die dieses "gebundene CO₂" dann als Kohlenstoff bzw. Kohlenhydrat im Körper anlagern, im Atmungsvorgang wieder abgeben oder als Exkremente wieder ausscheiden.

In den Futtererbsen und Ackerbohnen, die als Hackfrüchte verfüttert werden, sind 57 t Lachgas enthalten, so dass sich ein CO₂-Äquivalent von 32,6 Mio. t ergibt.

Tabelle 9-12: Menge und CO₂_{phr}-Bindung von Futtermitteln in Bayern im Jahr 2000

		Bedarf je Tier	Futter- menge absolut	CO ₂ - Bindung
		kg/a	1.000 t/a	1.000 t/a
Rinder	Getreide	402,6	1.601	2.267
	Hülsenfrüchte	21,1	84	95
	Kraftfutter	535,0	2.128	2.663
	Hackfrüchte	396,9	1.578	667
	Grünfutter und Heu	5.790,8	23.030	21.049
	Stroh	100,0	398	527
	Milch aller Art	183,1	728	143
	gesamt	7.429,6	29.547	27.411
Schweine	Getreide	492,0	1.853	2.623
	Hülsenfrüchte	10,4	39	44
	Kraftfutter	155,8	587	734
	Hackfrüchte	69,0	260	110
	Grünfutter und Heu	0,0	0	0
	Stroh	0,0	0	0
	Milch aller Art	68,2	257	50
	gesamt	795,3	2.995	3.561
Geflügel	Getreide	28,2	260	368
	Hülsenfrüchte	0,3	3	3
	Kraftfutter	18,4	170	213
	Hackfrüchte	0,0	0	0
	Grünfutter und Heu	0,0	0	0
	Stroh	0,0	0	0
	Milch aller Art	0,0	0	0
	gesamt	46,9	433	584
Schafe/ Ziegen	Getreide	66,0	32	45
	Hülsenfrüchte	0,8	0	0
	Kraftfutter	35,9	17	22
	Hackfrüchte	34,2	17	7
	Grünfutter und Heu	739,7	358	327
	Stroh	95,0	46	61
	Milch aller Art	4,8	2	0
	gesamt	976,3	472	463
Pferde	Getreide	279,8	34	48
	Hülsenfrüchte	0,0	0	0
	Kraftfutter	299,3	36	45
	Hackfrüchte	314,2	38	16
	Grünfutter und Heu	3.713,5	446	407
	Stroh	307,0	37	49
	Milch aller Art	18,6	2	0
	gesamt	4.932,4	592	565
Gesamt	Getreide	278,3	3.779	5.351
	Hülsenfrüchte	0,0	126	142
	Kraftfutter	301,1	2.938	3.677
	Hackfrüchte	314,2	1.892	800
	Grünfutter und Heu	3.713,5	23.834	21.783
	Stroh	307,0	480	636
	Milch aller Art	18,6	990	194
	gesamt	4.932,7	34.039	32.584
	gesamt ohne Kraftfutter	4.631,6	31.102	28.907

9.2.4 Abatmung von CO₂ in der Tierhaltung

Ein Teil des in den Futtermitteln gespeicherten Kohlenstoffs wird als Kohlendioxid beim Ausatmen der Tiere wieder abgegeben. Wie bei allen Säugetieren entsteht das Kohlendioxid beim Stoffwechsel in der Körperzelle. Beim Einatmen gelangt Sauerstoff in die Lunge, wo dieser über die Lungenbläschen ins Blut gelangt. Über das Blutkreislaufsystem gelangt Sauerstoff zu jeder Körperzelle, in der Glucose mit Sauerstoffverbrauch zur Energiegewinnung verbrannt wird. Das dadurch entstandene Kohlendioxid wird wiederum im Blutkreislaufsystem zur Lunge gebracht, wo es wegen der niedrigen CO₂-Konzentration in die Lunge diffundiert und beim Ausatmen in die Atmosphäre freigegeben wird.

Bei der Berechnung dienen die in Tabelle 9-10 enthaltenen Tierbestandszahlen als Ausgangsgröße, die zusammen mit den spezifischen Abatmungsmengen an CO₂ aus [39] mit

Formel 9-7: Berechnung der CO₂-Abatmung von in der Tierhaltung

$$m_{\text{CO}_2} = \sum_{i=1}^{\text{TA}} A_{\text{TA},i} * v_{\text{CO}_2,i} * f_i * a_{\text{CO}_2} * \rho_{\text{CO}_2} \quad [\text{kg}]$$

mit: m_{CO_2} = CO₂-Menge [kg]

A_{TA} = Anzahl der jeweiligen Tierart [Stück]

$v_{\text{CO}_2,i}$ = Atemzugvolumen der jeweiligen Tierart [l]

f_i = Atemfrequenz der jeweiligen Tierart pro Minute [1/min]

a_{CO_2} = CO₂-Gehalt in der Ausatemluft (hier 4 %) [%]

ρ_{CO_2} = Dichte von CO₂ (hier 1,97 g/l) [g/l]

TA = Tierart,

die absolute Menge an abgeatmetem CO₂ ergeben (**Tabelle 9-13**).

Tabelle 9-13: Abatmung von CO₂ in der Veredelungswirtschaft in Bayern im Jahr 2000

Tierart	Atem- volumen l/min	spez. CO ₂ - Abatmung l/a*Stück	Abatmung von CO ₂	
			spez. kg/ Stück*a	absolut 1.000 t/a
Rinder	50,00	1.051.200	8.118	16.692
Kälber	196,00	4.120.704	2.071	3.978
Schweine	7,48	157.154	431	1.622
Hühner	6,50	136.656	24	201
Puten	10,40	218.650	143	110
Enten	0,59	12.331	29	5
Gänse	3,45	72.533	64	1
Pferde	1,55	32.640	2.734	328
Schafe	0,69	14.507	310	144
Ziegen	66,00	1.387.584	269	5
Summe	.	7.203.958	.	23.086

Insgesamt werden 23,1 Mio. t CO₂ über die Abatmung der Tiere wieder freigesetzt. 72,3 % hiervon werden allein durch die Rinder verursacht, in weitem Abstand gefolgt von den Kälbern mit etwa 17,2 %. Die restlichen 10,5 % werden von den übrigen Tierarten abgeatmet, wobei hier neben dem Tierbestand die Größe der Tiere eine entscheidende Rolle spielt.

9.2.5 CO₂_{phr} in Exkrementen der Tierhaltung

Ein weiterer Teil des von den Tieren als Futter aufgenommen Kohlenstoffs wird als Kohlendioxid mit den Exkrementen ausgeschieden. Hierzu wird aus dem spezifischen Gülleanfall pro Tier und mit dem Gehalt der Trockensubstanz (TS) in der Gülle (Tabelle 9-14) die Trockensubstanz errechnet, aus der dann mit einem einheitlich zu 40 % angesetzten Kohlenstoffanteil die in den Exkrementen gebunden Menge an CO₂ pro Tier gewonnen wird, wobei folgende Beziehung gilt:

Formel 9-8: Berechnung der CO₂_{phr}-Bindung in Exkrementen der Tierhaltung

$$m_{\text{CO}_2\text{phr}} = \sum_{i=1}^{\text{TA}} A_{\text{TA},i} * a_{\text{TS},i} * a_{\text{C}} * 44/12 \quad [\text{kg}]$$

- mit: $m_{\text{CO}_2\text{phr}}$ = photosynthetisch reduzierte CO₂-Menge [kg]
 A_{TA} = Anzahl der jeweiligen Tierart [Stück]
 $a_{\text{TS},i}$ = Trockensubstanzanteil der Gülle der jeweiligen Tierart [%]
 a_{C} = C-Gehalt in der Gülle (hier 40 %) [%]
 44/12 = anrechenbare CO₂-Menge pro Kohlenstoffmenge [kg_{CO2}/kg]
 TA = Tierart

Tabelle 9-14: CO₂_{phr} in Exkrementen der Tierhaltung in Bayern im Jahr 2000

Tierart	Gülle- anfall t/GV*a	Gehalt an TS %	C-Anteil TM %	CO ₂ _{phr} -Ausscheidung	
				spez. t/GV*a	absolut 1.000 t
Milchkuh	18,8	10	40	2,8	4.689
Stärken und Fersen	16,5	10	40	2,4	928
Jungvieh	15,3	10	40	2,2	861
Mastkälber, -rinder	10,6	10	40	1,6	696
Zuchtsauen	10,8	10	40	1,6	335
Mastschweine	16,8	10	40	2,5	571
Aufzuchtferkel	18,0	10	40	2,6	150
Geflügel	7,1	75	40	7,8	430
Pferde	17,6	20	40	5,2	621
Schafe/Ziegen	6,5	20	40	1,9	92
Summe	.	.	.	.	9.373

Die absolute Menge an in Exkrementen gebundenem CO₂ wird durch Multiplikation der tierspezifischen Werte mit den absoluten Zahlen aus Tabelle 9-10 zu 9,4 Mio. t CO₂ pro Jahr ausgeschieden.

9.2.6 Methanfreisetzung in der Tierhaltung

Methanemissionen treten bei der Viehhaltung sowohl bei der Lagerung von Festmist bzw. Gülle, als auch bei der Verdauung der Wiederkäuer auf. Verdauungsbedingte Methanemissionen können relativ genau abgeschätzt werden, bei der Lagerung entstehende Emissionen hängen von sehr vielen Parametern wie Fütterung, Stall, Entmistung, Art und Dauer der Lagerung und der Lagertemperatur ab und können daher nur mit einer gewissen Unsicherheit angegeben werden.

Mit den spezifischen Methanemissionen der Viehhaltung aus [44] durch Stoffwechsel und Exkremen- te kann über die Tierbestandzahlen nach **Formel 9-9** eine gesamte CH₄-Ausscheidung von 0,4 Mio. t errechnet werden (**Tabelle 9-15**).

Formel 9-9: Berechnung der Methanfreisetzung in der Tierhaltung

$$m_{\text{CH}_4} = \sum_{i=1}^{\text{TA}} A_{\text{TA},i} \cdot (m_{\text{CH}_4,\text{SW},i} + m_{\text{CH}_4,\text{Exkr},i} \cdot a_{\text{KF},i}) \quad [\text{kg}]$$

mit: m_{CH_4} = freigesetzte CH₄-Menge [kg]

$A_{\text{TA},i}$ = Anzahl der jeweiligen Tierart [Stück]

$m_{\text{CH}_4,\text{SW},i}$ = Menge der CH₄-Ausscheidung durch Stoffwechsel der jeweiligen Tierart [kg/Stück]

$m_{\text{CH}_4,\text{Exkr},i}$ = Menge der CH₄-Ausscheidung durch Exkremen- te der jeweiligen Tierart [kg/Stück]

$a_{\text{KF},i}$ = Konversionsfaktor [%]

TA = Tierart

Tabelle 9-15: CH₄-Ausscheidungen in der bayerischen Veredelungswirtschaft im Jahr 2000

Tierart	CH ₄ -Ausscheidung				
	Stoff- wechsel kg/Tier*a	Exkremen- te		gesamt	
		spez. kg/Tier*a	Konv.- faktor	spez. kg/Tier*a	absolut 1.000 t/a
Milchkuh	99,8	181,4	11%	119,8	169,6
Stärken und Fersen	61,0	161,7	11%	78,8	50,4
Jungvieh	57,4	59,0	11%	63,9	81,8
Mastkälber, -rinder	65,0	161,7	11%	82,8	53,0
Zuchtsauen	1,3	32,0	9%	4,2	1,8
Mastschweine	1,3	32,0	9%	4,2	6,1
Aufzuchtferkel	1,3	14,0	9%	2,6	4,8
Geflügel	0,1	2,4	10%	0,3	3,1
Pferde	18,0	221,8	10%	40,2	4,8
Schafe/Ziegen	10,3	31,0	10%	13,4	6,5
Summe	.	.	.	.	381,9

Insgesamt ergibt sich ein CO₂-Äquivalent von 8,0 Mio. t, das zu rund 93 % durch die Haltung von Rindern verursacht wird.

9.2.7 Bindung in tierischen Produkten

Der über die Futtermittel aufgenommene Kohlenstoff gelangt über den Verdauungstrakt in den Körper und wird dort entweder eingelagert oder dient im Falle der Legehennen als Aufbaustoff für die Eier. Die Produktmenge aus [40] berücksichtigt nur das Schlachtgewicht der Tiere, in dem in der Regel keine Innereien, Füße, Köpfe, Felle oder ähnliches mehr enthalten ist. Diese Reststoffe aus der Fleischproduktion sind in der Bilanz nicht berücksichtigt, da über deren Menge und heutige Verwendung keine genauen Angaben vorliegen.

Über den Wassergehalt aus [39] des jeweiligen Produktes wird die Trockenmasse berechnet, aus der mit dem Kohlenstoffgehalt der Trockenmasse aus [39] und der molaren Masse von CO₂ in Höhe von 44/12 g/mol die absolute CO₂_{phr}-Bindung bestimmt wird (**Tabelle 9-16**).

Tabelle 9-16: Bindung in tierischen Produkten in Bayern im Jahr 2000

		Produkt- menge absolut 1.000 t/a	Wasser- gehalt %	Gewicht der TM 1.000 t/a	C-Gehalt TM %	CO ₂ _{phr} - Bindung absolut 1.000 t/a
Veredelungswirtschaft	Milch	7650,0	87,3	972	6,9	246,9
	Rindfleisch	380,4	65,2	132	22,8	110,8
	Kalbfleisch	10,6	67,0	4	16,7	2,1
	Schweinefleisch	512,0	68,3	162	18,2	108,2
	Schaffleisch	3,0	76,0	1	12,5	0,3
	Geflügelfleisch	70,0	64,8	25	22,1	19,9
	See- und Fluß-Fische	0,6	76,0	0	13,3	0,1
	Karpfen	6,5	75,8	2	12,2	0,7
	Forellen	8,0	76,3	2	11,3	0,8
	Honig	8,5	17,2	7	42,0	10,8
	Eier	74,0	77,0	17	15,1	9,4
	gesamt			1.323	.	510,1

Von den insgesamt 0,51 Mio. t CO₂_{phr} stammen 48,4 % bzw. 0,25 Mio. t CO₂_{phr} von der Milch, 21,7 % bzw. 0,11 Mio. t vom Rindfleisch und etwa 21,2 % oder 0,11 Mio. t vom Schweinefleisch. Der Rest entsteht im wesentlichen bei der Erzeugung von Geflügelfleisch, Honig und Eiern.

Hinzu kommen noch die Felle der Tiere, die zunehmend für die Weiterverarbeitung in der Lederindustrie verwendet werden. Ausgehend von den Schlachtungen und der mittleren Fellgröße pro Tier kann über die Trockenmasse und deren C-Gehalt die in den Fällen gespeicherte Menge an CO₂_{phr} berechnet werden. Als Ergebnis erhält man eine CO₂_{phr}-Bindung von 0,04 Mio. t.

9.2.8 Ergebnis der Strukturanalyse der Veredelungswirtschaft

Die gesamten CO₂_{Äqu}-Emissionen des Bilanzraumes "Veredelungswirtschaft" (**Tabelle 9-17**) werden zu 98 % durch die in den Bilanzraum der Veredelungswirtschaft einfließenden gebundenen Emissionsmengen der Futtermittel verursacht. Die Kraft- und Betriebsstoffe haben einen Anteil von 0,70 %, gefolgt von den Brennstoffen mit 0,66, dem Strom 0,38 % und den Maschinen und Geräten mit 0,28 % am CO₂-Äquivalent.

Tabelle 9-17: Inputbilanz der Veredelungswirtschaft in Bayern im Jahr 2000

Art	CO ₂ -Emissionen bzw. CO _{2phr} -Input		CO _{2Äqu} -Emissionen bzw. CO _{2Äqu-phr} -Input	
	absolut t/a	Anteil %	absolut t/a	Anteil %
Brennstoffe	0,27	0,80	0,28	0,66
Strom	0,13	0,38	0,16	0,38
Kraft-/Betriebsstoffe	0,27	0,81	0,29	0,70
Maschinen/ Geräte	0,12	0,35	0,12	0,28
Futtermittel	32,58	97,67	40,60	97,98
Summe	33,36	100,00	41,44	100,00

Der Inputbilanz steht die Output- bzw. Bindungsbilanz gegenüber. Das in den Futtermitteln gebundene CO₂-Äquivalent in Höhe von 41,4 Mio. t (**Tabelle 9-18**) wird durch die Stoffwechselprodukte der Tiere aus den Futtermitteln freigesetzt, in Form von CO₂-Abatmung über die Lunge 55,7 %, über die CO₂-Ausscheidung in Exkrementen 22,6 % und über den Methanausstoß durch Stoffwechsel und Exkremente 19,4 %.

Nur etwa 1,23 % des in die Veredelungswirtschaft eingehenden, in Form von Kohlenstoff gebundenen CO_{2phr} werden im Körper des Tieres für die spätere Verwendung als Nahrungsmittel abgelagert, zusätzlich sind 0,09 % in den Tierfellen gebunden. Das verbleibende Restglied in der Bilanz der Veredelungsbetriebe in Höhe von 0,42 Mio. t kann den Reststoffen bei der Tierschlachtung zugeordnet werden.

Tabelle 9-18: Output/ Bindungsbilanz der Veredelungswirtschaft in Bayern im Jahr 2000

Art	CO ₂ -Output -bzw. CO _{2phr} - Bindung		CO _{2Äqu} -Output -bzw. CO _{2Äqu-phr} -Bindung	
	absolut t _{phr} /a	Anteil %	absolut t _{phr} /a	Anteil %
Tierabatmung	23,09	69,20	23,09	55,70
Tierexkremente	9,37	28,09	9,37	22,62
Methan	0,00	0,00	8,02	19,35
tier. Produkte	0,51	1,53	0,51	1,23
Tiefelle	0,04	0,11	0,04	0,09
Bilanzrest	0,36	1,07	0,42	1,01
Summe	33,36	100,0	41,44	100,0

9.3 Gesamtstruktur der Land- und Forstwirtschaft

Zur Bewirtschaftung von Feld, Acker und Wald müssen Energie (Brennstoffe, Strom und Kraftstoffe), Dünge- und Pflanzenschutzmittel, Saatgut und Maschinen eingesetzt werden. Beim Energieumsatz fallen insgesamt 3,08 t CO₂ bzw. 4,47 t CO_{2Äqu} an. Von besonderem Interesse ist dabei die Veredelungswirtschaft, denn sie benötigt neben dem Futtermittelbedarf zusätzliches Krafffutter, Energie (Kraft- und Betriebsstoffe, Strom) sowie Maschinen und Geräte – insgesamt 4,46 Mio. t CO₂ bzw.

4,52 Mio. t CO_{2Äqu}. Mit diesem Einsatz an Energie, Produkten und Hilfsprodukten werden aber auch durch photosynthetische Prozesse der Biomassegewinnung 44,06 Mio. t CO₂ bzw. 42,69 Mio. t CO_{2Äqu} der Atmosphäre entzogen. Dies äußert sich in einem entsprechenden Stoffzuwachs auf Feld, Acker und den Forsten.

Daraus kann eine photosynthetisch gebundene CO₂-Menge errechnet werden, wobei Produkte und Futtermittel binnen Jahresfrist bei Vermarktung und Einsatz in der Veredelungswirtschaft die gebundenen Mengen als CO₂ wieder freisetzen.

Der Output der Veredelungswirtschaft belegt, dass der Abatmung der Tiere, den ausgeschiedenen Exkrementen und weiteren stofflichen Verlusten insgesamt rund 32,82 Mio. t CO_{2phr} bzw. aufgrund der Methanemissionen im wesentlichen durch die Rinderhaltung 40,90 Mio. t CO_{2Äqu-phr} zugerechnet werden können, die relativ kurzfristig binnen Jahresfrist wieder an die Atmosphäre abgegeben werden. Da auch die Zielprodukte "tierische Produkte" mit 0,51 Mio. t CO_{2phr} bzw. CO_{2Äqu-phr} und die Tierfelle mit 0,04 Mio. t CO_{2phr} bzw. CO_{2Äqu-phr} wieder kurzfristig vermarktet und umgesetzt werden, ist eine Art CO₂-Kreislauf gegeben.

Tabelle 9-19: Gesamtstruktur der Land- und Forstwirtschaft in Bayern im Jahr 2000

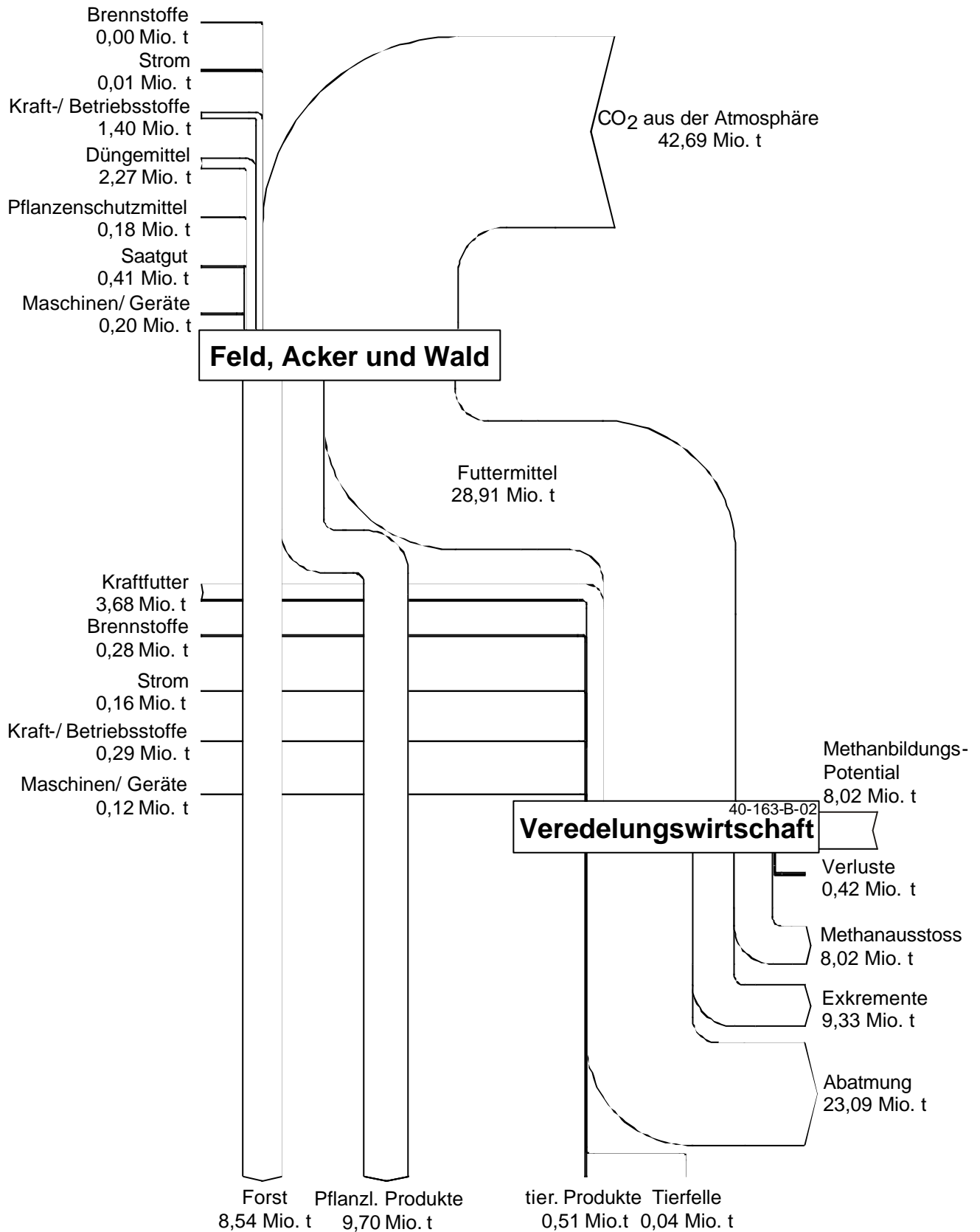
	Mio. t CO ₂	Mio. t CO _{2Äqu}
CO _{2Äqu} -Mengen des Energie-, Betriebsmittel- und Produkteinsatzes in Feld, Acker und Wald	3,08	4,47
CO _{2Äqu} -Mengen des Energie-, Betriebsmittel- und Produkteinsatzes in der Veredelungswirtschaft	4,46	4,52
Photosynthetische CO ₂ -Bindung	-44,06	-42,69
1. Zwischensaldo	-36,52	-33,71
Freisetzung der Veredelungswirtschaft	32,82	40,90
Freisetzung durch pflanzliche Produkte	9,70	9,71
tierische Produkte	0,51	0,51
2. Zwischensaldo	6,50	17,41
Forstwirtschaftlich gebundene CO ₂ -Menge	-8,54	-8,54
Tierfelle	-0,04	-0,04
3. Zwischensaldo	-2,07	8,84

Würde der forstwirtschaftliche Zuwachs bei Einschlag nur stofflich und zudem langfristig genutzt, wäre mit der bayerischen Land- und Forstwirtschaft eine kleine CO₂-Senke in Höhe von -2,07 Mio. t CO₂ ausweisbar. Demgegenüber steht ein Mehrausstoß an CO_{2Äqu} von 8,84 Mio. t aufgrund der Treibhausgase Methan und Lachgas.

Bei kurzfristiger Umsetzung des forstwirtschaftlichen Zuwachses in Form von Holzschliff, Energie etc. würde im ungünstigsten Fall die bayerische Land- und Forstwirtschaft die bayerische CO₂-Bilanz mit 15,03 Mio. t CO₂ bzw. sogar 25,95 Mio. t CO_{2Äqu} belasten.

Das CO_{2Äqu}-Flussdiagramm (**Bild 9-1**) veranschaulicht als Jahresbilanz die Quellen sowie die kurz-, mittel- und längerfristigen Senken für CO_{2Äqu}.

Bild 9-1: Jahresbilanz umgesetzter und gebundener CO₂Äqu-Mengen in Bayern im Jahr 2000



Es zeigt dabei auch, dass bei Ausbau energietechnisch nutzbarer Produkte (zum Beispiel Natur- oder Biodiesel, Nutzung von Waldrestholz, etc.) eine Substitution konventioneller Energie grundsätzlich möglich ist und damit die Bilanz weiter verbessert werden könnte.

Die CO_2 - und $\text{CO}_{2\text{Äqu}}$ -Gesamtbilanz der bayerischen Land- und Forstwirtschaft vermittelt so gesehen einen aktuellen Sachstand, für den gilt:

- für die Produktion von tierischen Produkten muss sehr viel $\text{CO}_{2\text{phr}}$ umgesetzt werden, um die gewünschten Produkte zu erhalten. Der größte Teil des in den Futtermitteln enthaltenen $\text{CO}_{2\text{phr}}$ wird von den Tieren als Stoffwechselprodukt über die Atemwege bzw. als Exkremente wieder ausgeschieden und gelangt somit wieder in die Atmosphäre zurück und kann von den Pflanzen über die Photosynthese wieder aufgenommen werden. Hierbei wird im Verdauungstrakt der Rinder weit klimawirksameres Methan erzeugt, was in der Bilanz durch den zusätzlichen Eingangspfeil veranschaulicht wird.
- das in den pflanzlichen Produkten gebundene $\text{CO}_{2\text{phr}}$ verlässt den Bilanzraum zusammen mit dem in den tierischen Produkten gebundenen $\text{CO}_{2\text{phr}}$ für eine weitere Verwendung mit überwiegend kurzfristiger Umsetzung.
- das durch Forst bzw. im Wald gebundene $\text{CO}_{2\text{phr}}$ bzw. $\text{CO}_{2\text{Äqu-phr}}$ verlässt den Bilanzraum für eine weitere Verwendung, überwiegend verbunden mit einer länger- bzw. langfristigen Umsetzung

10 Potentialabschätzung für die Land- und Forstwirtschaft

Die Potentialabschätzung für die Land- und Forstwirtschaft beschränkt sich, wie bereits in Kapitel 8 erläutert, nur auf Maßnahmen zur Bindung bzw. Senkung von CO₂ bzw. CO_{2Äqu}-Emissionen. Allen Maßnahmen gemeinsam sind die in dem folgenden Unterkapitel beschriebenen Ansätze, von denen nur für die Bestimmung der Sensitivität abgewichen wird.

Hier erfolgt die Umsetzung der Maßnahmen direkt auf bestehende Strukturen, da die in Kapitel 8 vorgeschlagenen Maßnahmen für diesen Sektor auf mittleren Werten für Bayern beruhen und die Brachflächen, auf denen diese Maßnahmen durchgeführt werden, über Gesamtbayern verstreut sind.

10.1 Randbedingungen

Als Flächen für die Durchführung der Maßnahmen zur Bindung bzw. Senkung von Emissionen stehen nur die Brachflächen zur Verfügung, da alle anderen land- und forstwirtschaftlich genutzten Flächen bereits anderweitig genutzt werden. Von diesen Brachflächen wiederum können nicht 100 % genutzt werden, da sich nicht alle Flächen für die angestrebte Nutzung eignen.

Im Freistaat Bayern standen im Jahr 2000 nach [45] etwa 122.000 ha Brachfläche zur Verfügung, die nur etwa 3,8 % der gesamten landwirtschaftlich genutzten Fläche ausmachen.

Für die Potentialabschätzung werden deshalb folgende maximale Flächennutzungen angenommen:

- Für den Winterweizenanbau können nur etwa 50 % der Brachflächen genutzt werden.
- Die (Wieder-)Aufforstung ist nur bei 40 % der Fläche möglich.
- Schweinezucht kann nur auf 30 % der Fläche erfolgen
- Der Anbau von Raps für die Rapsmethylester-Erzeugung ist auf 50 % der Fläche möglich.

Die spezifischen Erträge werden aus Kapitel 8 übernommen.

10.2 Potentialsabschätzung

Mit den in den Randbedingungen festgelegten maximalen Flächenanteilen kann nun folgende Potentialabschätzung getroffen werden (**Tabelle 10-1**).

Tabelle 10-1: Potentialabschätzung für die Land- und Forstwirtschaft

		Winter- weizen	Auf- forstung	Schweine- zucht	RME ohne RSV	RME mit RSV
gesamte Brachfläche	ha	122.000	122.000	122.000	122.000	122.000
davon für Anbau geeignet	.	50%	40%	30%	50%	50%
damit zusätzl. Anbaufläche	ha	61.000	48.800	36.600	61.000	61.000
spezifischer Ertrag	kg/ha*a	6.800	3.268	1.424	1.172	1.172
absoluter Ertrag	t/a	414.800	159.478	52.133	71.520	71.520
CO ₂ -Minderung	kg/ha*a	8.281	8.500	-8.897	2.255	2.993
CO _{2Äqu} -Minderung	kg/ha*a	7.415	8.500	-9.267	2.560	3.297
CO ₂ -Minderung	1.000 t/a	505	415	-326	138	183
CO _{2Äqu} -Minderung	1.000 t/a	452	415	-339	156	201

Hektarspezifisch betrachtet weist die Aufforstung das höchste Minderungspotential auf, in geringem Abstand gefolgt vom Anbau von Winterweizen. Mit deutlichem Abstand folgt die RME-Erzeugung, wobei die Variante mit RSV größere Einsparung aufweist, als die Variante ohne RSV. Die Schweinezucht weist eine negative Minderung, also einen Mehrausstoß aus.

Unter Berücksichtigung der geeigneten Brachflächen erweist sich der Anbau und der Export von Winterweizen als Maßnahme mit dem größten Potential, die Aufforstung folgt aufgrund weniger geeigneter Fläche danach mit etwa 80 % der Einsparung durch den Weizenanbau. Der Anbau von Raps und die anschließende RME-Erzeugung kann nur rund 30 % des Potentials von Winterweizen erreichen.

10.3 Variationsrechnungen und Sensitivitätsanalysen

Fixe Winterweizenanbaufläche

Wählt man den Anteil der für Winterweizenanbau geeigneten Fläche als feste Größe und variiert die Anteile der anderen Maßnahmen so, dass das gleiche $\text{CO}_2\text{-Äqu}$ -Minderungspotential bzw. im Falle der Schweinezucht ein Emissionsausgleich erreicht wird, so stellt sich folgendes Ergebnis dar (**Tabelle 10-2**).

Tabelle 10-2: Variationsrechnung fixer Winterweizenanteil

		Winterweizen	Aufforstung	Schweinezucht	RME ohne RSV	RME mit RSV
Brachfläche	ha	122.000	122.000	122.000	122.000	122.000
davon für Anbau geeignet	.	50%	44%	40%	145%	112%
damit zusätzl. Anbaufläche	ha	61.000	53.178	48.800	176.582	137.174
spezifischer Ertrag	kg/ha*a	6.800	3.268	1.424	1.172	1.172
absoluter Ertrag	t/a	414.800	173.785	69.511	207.035	160.831
CO_2 -Minderung	kg/ha*a	8.281	8.500	-8.897	2.255	2.993
$\text{CO}_2\text{-Äqu}$ -Minderung	kg/ha*a	7.415	8.500	-9.267	2.560	3.297
CO_2 -Minderung	1.000 t/a	505	452	-434	398	411
$\text{CO}_2\text{-Äqu}$ -Minderung	1.000 t/a	452	452	-452	452	452

Für die Erreichung der $\text{CO}_2\text{-Äqu}$ -Minderung durch Winterweizen (Flächenbedarf von 50 % der Brachfläche) sind nur etwa 44 % der Fläche aufzuforsten, für die RME-Erzeugung reicht die Fläche nicht aus (145 % bzw. 112 %). Die Kompensation dieser Minderungs Menge wird durch Schweinehaltung auf 40 % der Fläche erreicht.

Man erkennt daraus, dass sich die Auswahl von Maßnahmen im Bereich der Land- und Forstwirtschaft auf nur wenige Alternativen einschränkt.

Ausgleich der Mehremissionen der Schweinezucht

Eine Verstärkung der Schweinezucht zur Anhebung der Fleischproduktion zieht nicht unerhebliche Mehremissionen nach sich. In dieser Variation soll dargestellt werden, welche Flächenanteile durch die anderen Maßnahmen zu nutzen sind, damit eine Schweineaufzucht auf 20 % der Brachfläche emissionsmäßig ausgeglichen werden kann.

Aus **Tabelle 10-3** erkennt man, dass diese Mehremissionen durch den Aufforstung von 22 % der gesamten Brachfläche, durch Anbau von Winterweizen auf 25 %, oder durch die Ansaat von Raps auf 56 % mit RSV bzw. auf 72 % ohne RSV erreicht werden kann.

Tabelle 10-3: Ausgleich der Mehremissionen der Schweinezucht

		Winter- weizen	Auf- forstung	Schweine- zucht	RME ohne RSV	RME mit RSV
Brachfläche	ha	122.000	122.000	122.000	122.000	122.000
davon für Anbau geeignet	.	25%	22%	20%	72%	56%
damit zusätzl. Anbaufläche	ha	30.493	26.601	24.400	88.291	68.542
spezifischer Ertrag	kg/ha*a	6.800	3.268	1.424	1.172	1.172
absoluter Ertrag	t/a	207.351	86.931	34.755	103.517	80.362
CO ₂ -Minderung	kg/ha*a	8.281	8.500	-8.897	2.255	2.993
CO ₂ Äqu-Minderung	kg/ha*a	7.415	8.500	-9.267	2.560	3.297
CO ₂ -Minderung	1.000 t/a	253	226	-217	199	205
CO ₂ Äqu-Minderung	1.000 t/a	226	226	-226	226	226

11 Zusammenfassung und Ausblick

Die möglichen Folgen anthropogen verursachter Klimaänderungen können nicht genau vorhergesagt werden, doch kommt der Minderung energiebedingter Treibhausgasemissionen durch rationelle Energienutzung und verstärkte Nutzung erneuerbarer Energien schon allein aus Gründen der Ressourcenschonung allergrößte Bedeutung zu.

Im Protokoll von Kyoto aus dem Jahre 1997 verpflichteten sich die unterzeichnenden Staaten ihre treibhauswirksamen Gase im Zeitraum 2008 bis 2012 um insgesamt 5 % unter den Stand von 1990 zu senken, als wesentlicher Schritt zur Reduzierung der Folgen anthropogenen Handelns. Der Freistaat Bayern trägt die Minderungsziele der Bundesrepublik, die sich zu einer Minderung ihrer klimawirksamen Gase um 21 % verpflichtet hat, mit, möchte aber bestimmte Voraussetzungen und Gegebenheiten wie den hohen Durchgangsverkehr durch die geographische Lage oder den um bereits ein Drittel unter dem Bundesdurchschnitt liegenden Pro-Kopf-Ausstoß von CO₂-Emissionen berücksichtigt wissen. Das von der bayerischen Staatsregierung am 17.10.2000 beschlossene Klimaschutzkonzept beinhaltet diese Aspekte und setzt verschiedenen Schwerpunkte, unter anderem in der Gebäudesanierung bei Altbauten und in der Land- und Forstwirtschaft durch Biomassenutzung.

Zur Umsetzung dieses Klimaschutzkonzeptes gibt es verschiedene Ansätze, von denen in der vorliegenden Arbeit einige Möglichkeiten zur Umsetzung von Maßnahmen im Haushaltsbereich und in der Land- und Forstwirtschaft zur Minderung von Primärenergieverbrauch und treibhausgaswirksamen Emissionen in Bayern aufgezeigt werden. Zusätzlich werden mögliche Einsparpotentiale unter verschiedenen Gesichtspunkten wie maximaler Einsparung oder minimalen Vermeidungskosten abgeschätzt.

Eine detaillierte Strukturanalyse der beiden untersuchten Bereiche bildet die Basis, auf der dann unter Verwendung verschiedener Maßnahmen und Optimierungsziele mögliche Einsparungspotentiale ausgewiesen werden können, wobei die Umsetzung der im Einzelnen beschriebenen Maßnahmen sich an der jeweiligen Struktur und deren aktuellen Referenzdaten orientiert. Die in dieser Arbeit untersuchten Maßnahmen werden lebenszyklisch von der Herstellung, über die Nutzung bis hin zur Entsorgung unter Energie-, Emissions- und Kostenaspekten betrachtet.

Haushalte

Auf der Grundlage von statistischen Daten, Untersuchungsauswertungen und eigenen Berechnungen wird ein Modell entwickelt, aus dem schließlich eine detaillierte Ausweisung des Energieverbrauchs und Emissionsausstoßes im Haushaltsbereich erfolgt, aufgeteilt nach Gebäudeart und -größe, Energieträgern und der Beheizungsart. Hierbei wird deutlich, dass die Gebäudebeheizung und Warmwasserbereitung in den Haushalten etwa 86 % des gesamten Endenergieeinsatzes, 89 % bei den CO₂-Emissionen und etwa 88 % bei den CO₂Äqu-Emissionen verursacht.

Die zur Minderung des Energieverbrauchs und der Emissionen vorgeschlagenen und näher untersuchten Maßnahmen umfassen einen sehr breiten Anwendungsbereich und reichen von der Wärmedämmung von Gebäudeteilen über die Wärmeversorgung von Gebäuden bis hin zu Maßnahmen zur Minderung des Stromverbrauchs. Hierbei werden neben konventionellen auch innovative und regenerative Techniken betrachtet.

Die Abschätzung der Minderungspotentiale errechnet sich für den Haushaltsbereich aus dem Gebäudebestandsmodell, indem die auf die jeweiligen Typgebäude angepassten Maßnahmen unter Beachtung festgelegter Randbedingungen angewandt werden. Im Haushaltsbereich gibt es demnach ein sehr großes Minderungspotential für Energie in Höhe von etwa 50 TWh bzw. 32 % und ein noch größeres Potential für Emissionen von etwa 13 Mio. Tonnen oder 50 %. Hierfür müssen jährlich zwischen 4,4 und 6,4 Milliarden Euro aufgewendet werden.

Die Dämmung des Gebäudebestandes auf EnEV-Standard vermindert den Energieverbrauch allein bereits um 23,5 %, bei den Emissionen sind es etwa 36 %; je nach Optimierungsziel ziehen die hierzu getätigten Investitionen hierfür jährlich vier bis fünf Milliarden Euro an Kosten nach sich.

Mit Erdgas oder Heizöl befeuerte Zentral-Heizungsanlagen haben mit etwa 70 % nicht nur den größten Anteil am Bestand, sondern sind auch leicht durch modernere Anlagen zu ersetzen, was Einsparungen an Energie und Emissionen in Höhe von etwa 11 % nach sich zieht. Dafür müssen jährlich etwa 0,75 Mrd. € für Kapitalkosten aus den Investitionen ausgegeben werden.

Land- und Forstwirtschaft

Die Land- und Forstwirtschaft konnte in dieser Arbeit erstmals einer vollständigen Input-Output-Analyse unterzogen werden, bei der nicht nur die Emissionen durch den Energieeinsatz, sondern auch das durch Photosynthese aus der Atmosphäre in die Pflanzen eingebundene CO₂ bilanziert wird. Dabei wird deutlich, dass die Produktion von pflanzlichen Produkten pro eingesetztem Kilogramm CO₂ etwa 14 kg CO₂ aus der Atmosphäre bindet. Die Veredelungswirtschaft hingegen emittiert das in den Futtermitteln gebundene CO₂ über Abatmung, Exkrememente zu 98,8 %, lediglich 1,2 % des in den Futtermitteln enthaltenen CO₂ werden in tierischen Produkten in Form von zum Beispiel Fleisch oder Milch gebunden. Zusätzlich zu CO₂ wird in der Veredelungswirtschaft eine große Menge des 21-Mal treibhauswirksameren Methans freigesetzt.

In diesem Sektor zeigen die untersuchten Maßnahmen einige Wege zur Minderung von Energieverbrauch und Emissionen unter nachhaltigen Aspekten auf. Dabei werden für ausgewählte Bereiche die Nahrungsmittelerzeugung am Beispiel von Winterweizenanbau und der Schweinezucht, die Kraftstofferzeugung am Beispiel von Rapsmethylester und die (Wieder-) Aufforstung untersucht.

Die Potentialabschätzung in der Land- und Forstwirtschaft beruht auf der Nutzung von Brachflächen, da alle anderen land- und forstwirtschaftlich genutzten Flächen bereits anderweitig genutzt werden. Hierbei wird deutlich, dass durch Land- und Forstwirtschaft gegen über dem Haushaltsbereich nur ein geringes Minderungspotential von maximal 0,5 Mio. Tonnen CO₂ besteht, wenn auf Brachflächen pflanzliche Produkte angebaut werden. Die Haltung von Tieren verursacht hingegen erhöhte Emissionen gegenüber der Brache.

Insgesamt wird deutlich, dass durch Wärmedämmung und Ersatz von älteren Zentralheizungsanlagen im Sektor Haushalte etwa 50 % der gesamten CO₂-Emissionen eingespart werden können, im Sektor Land- und Forstwirtschaft hingegen bei unveränderter Produktionsstruktur kaum Einsparungen möglich sind.

Mit der in dieser Arbeit vorgestellten Methodik der Potentialabschätzung aus den Maßnahmen und den detaillierten Strukturanalysen für den Haushaltsbereich und die Land- und Forstwirtschaft steht

ein umfassendes Werkzeug zur Ausweisung von nicht an die Grenzen Bayerns gebundenen Minderungspotentialen für Energie und Emissionen, Kosten und Investitionen zur Verfügung.

Der Maßnahmenkatalog und die darauf aufbauenden Potentialabschätzungen können verschiedenen Personengruppen wie Entscheidungsträgern in Politik und Gesellschaft vielfältige Fakten bei Fragen zur Reduzierung der Primärenergie-Minderung und des CO₂-Ausstoßes liefern und damit auch Denkanstöße geben.

Mit Hilfe des vorgestellten Verfahren ist es möglich, den Bilanzraum bei ausreichender Datenlage beliebig zu verändern und je nach Bedarf groß- oder kleinräumiger auszuweisen. Verschiedene Einflussgrößen wie energieträgerspezifische Daten oder unterschiedliche Optimierungsziele wie maximale Einsparung an Energie, Emissionen oder minimale Vermeidungskosten können berücksichtigt werden.

Für zukünftige Arbeiten bietet die vorliegende Arbeit eine Datengrundlage, wenn zum Beispiel in der Land- und Forstwirtschaft nachwachsenden Rohstoffe auf den Brachflächen als Ersatz von konventionellen Produkten angebaut werden.

12 Literatur

- [1] Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen: Klimaschutzkonzept der bayerischen Staatsregierung. München, November 2000.
- [2] Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Verkehr und Technologie: Energiebilanz Bayern – Daten, Fakten, Tabellen. Stand: November 2002.
- [3] IKARUS-Datenbank, Stand 02/2002
- [4] Zurückgezogene Version der VDI 2067, Blatt 2: Berechnung der Kosten von Wärmeherzeugungsanlagen, Raumwärme., Düsseldorf, Dezember 1993.
- [5] B. Geiger, H Kleeberger: Methodik zur Strukturentwicklung und Prognose des Haushaltsstromverbrauchs. Unveröffentlichte Programmstudie am Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik der TU München.
- [6] B. Geiger, M. Hardi: Energieanstoßberatung des Kaminkehrerhandwerks in Bayern, Endbericht. Unveröffentlichte Studie am Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik der TU München in Zusammenarbeit mit dem Landesinnungsverband für das Bayerische Kaminkehrerhandwerk. München, Mai 2002.
- [7] VDI Gesellschaft Energietechnik: Richtlinie VDI 4600: Kumulierter Energieaufwand – Begriffe, Definitionen, Berechnungsmethoden. Berlin: Beuth-Verlag, 1997.
- [8] Fachinformationszentrum Karlsruhe, Informationsdienste: IKARUS - Instrumente für Klimagas-Reduktionsstrategien. Stand: Januar 2003
- [9] lehrstuhleigene Datenbank für energetische Aufwendungen zur Herstellung, Entsorgung und Nutzung verschiedener Güter und Dienstleistungen, Stand: Januar 2003
- [10] Lukner/ Benkert: Energietechnologien und ihre Umweltauswirkungen. Stand- Entwicklung -Perspektiven. Verlag TÜV Rheinland, Köln 1989.
- [11] U. Wagner: Wärmegewinnung aus chemisch und physikalisch gebundener Energie, IfE Schriftenreihe, Heft 36. E&M-Verlag, Herrsching 1997.
- [12] Hardi M., B. Geiger: Möglichkeiten kommunaler CO₂- Minderungsmaßnahme, IfE Schriftenreihe, Heft 46. E&M-Verlag, Herrsching 2002.
- [13] Verordnung über den energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung- EnEV) vom 16.11.2001, Verordnung und Begründung, wie am 21.11.2001 im Bundesgesetzblatt Nr. 59 verkündet.
- [14] Forschungsstelle für Energiewirtschaft, D. Köhler, R. Wabro, Th. Fleißner, B. Geiger: Bilanzierung verschiedener Bauteil- und Fensterkonstruktionen für das Informationsprogramm der VEW ENERGIE AG zum Thema Wärmeschutzverordnung 1995. München, April 1997

-
- [15] C. Hoffmann, A. Kerschberger, S. Ruff: Kostenermittlung für wärmetechnische Maßnahmen an der Gebäudehülle, Neuauflage des IKARUS-Berichts 5-10. Stuttgart: Forschungszentrum Jülich GmbH, November 2000.
- [16] Bauer, Bressler, Günther-Pomhoff: Ganzheitliche Bilanzierung von elektrisch angetriebenen Wärmepumpen als Basis einer Ökobilanz, Endbericht. München, Juni 1996.
- [17] Simulationsprogramm Helios für Sonnenkollektoranlagen. Interne Software des Lehrstuhls für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik, Stand November 2002.
- [18] Alfred Viertelböck: Ökologische Optimierung von Niedrigenergiehäusern. Diplomarbeit am Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik der TU München. München, Mai 1995.
- [19] Kreative Energietechnik Stefan Schubert GmbH: Aktuelle Projekte: Biomasseheizwerk Ruhpolding. Internet-Homepage, Stand 11/ 2002.
- [20] U. Wagner, Chr. Timpe, E. Gross: Thesenpapier zur Kraft-Wärme-Kopplung. Auftrag für die Enquete-Kommission „Mit neuer Energie ins neue Jahrtausend,“ des Bayerischen Landtages. München, Freiburg, Landshut, Mai 2000.
- [21] Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V. (ASUE) als Herausgeber: BHKW-Kenndaten 2001. Frankfurt am Main, 2001.
- [22] Öko-Institut e.V. u.a.: Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme (Gemis), Version 4.13. Darmstadt, Mai 2002.
- [23] Eurosol GmbH & Co. KG, Ginsterweg 48, 67067 Ludwigshafen via Internet, Stand: Januar 2003.
- [24] Heizmann-System-Elektronik GmbH, Mainzenwies, 35753 Greifenstein/Beilstein via Internet, Stand: Januar 2003.
- [25] Forschungsstelle für Energiewirtschaft, Ganzheitliche Bilanzierung der Energiebereitstellung (GABIE), Teil IV, Energetische Untersuchung von Blockheizkraftwerken, Endbericht. München, Oktober 1996.
- [26] Ralf Ebersperger: Kumulierter Energieverbrauch von Glühlampen und Kompaktleuchtstofflampen. Diplomarbeit am Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik der TU München, München, März 1991.
- [27] Produktkatalog 2000/2001 der Firma Osram AG, München.
- [28] Bayerisches Staatsministerium für Landwirtschaft und Forsten, Bayerische Staatsforstverwaltung, 80535 München. Telefonische Auskunft im Juni 2001.
- [29] M. Hardi, B. Geiger, B. Vieten: CO₂-Bilanz der Land- und Forstwirtschaft in Bayern. Studie des Lehrstuhls für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik im Auftrag des Bayerischen Staatsministeriums für Landwirtschaft und Forsten, München, Juni 2002.

- [30] Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik im Auftrag für das Bayerische Staatsministerium für Landwirtschaft und Forsten: Ganzheitliche Systemanalyse für die Erzeugung und Anwendung von Biodiesel und Naturdiesel im Verkehrssektor, gelbes Heft 72, Landtechnische Berichte aus Praxis und Forschung. München: Bayerisches Staatsministerium für Landwirtschaft und Forsten, Juni 2001.
- [31] B. Geiger, Th. Fleißner, P. Tzscheutschler: Minderung der klimarelevanten Emissionen in Bayern. Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik der TU München in Zusammenarbeit mit dem Deutschen Institut für Wirtschaftsforschung Berlin (DIW) und der Forschungsstelle für Energiewirtschaft (FfE) im Auftrag des Bayerischen Staatsministeriums für Landesentwicklung und Umweltfragen. München, März 1999.
- [32] Bayerisches Landesamt für Statistik und Datenverarbeitung: Statistisches Jahrbuch für Bayern 2001. Bayerisches Landesamt für Statistik und Datenverarbeitung, München, Dezember 2001.
- [33] R. David, M. Elsberger, L. Rouvel: Gebäude- und Beheizungsstruktur der Wohngebäude in den Alten und Neuen Bundesländern, Neuauflage des Berichtes 507. Jülich: Forschungszentrum Jülich GmbH, Oktober 2000.
- [34] Landesinnungsverband für das Bayerische Kaminkehrerhandwerk: Erhebungen des Schornsteinfegerhandwerks für 2001.
- [35] P. Deutscher, M. Elsberger, L. Rouvel: Daten zum Heiz- und Warmwasserbedarf im Freistaat Bayern. Untersuchung im Auftrag des Institutes für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER) der Universität Stuttgart. München, Juni 1999.
- [36] Bernd Geiger, Edelgard Gruber, Werner Megele: Energieverbrauch und Einsparung in Gewerbe, Handel und Dienstleistung. Technik, Wirtschaft und Politik, Schriftenreihe des Fraunhofer-Instituts für Systemtechnik und Innovationsforschung (ISI). Heidelberg: Physica-Verlag, 1999.
- [37] Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen: Verkehr in Zahlen 2000/2001, 30. Jahrgang. Hamburg: Deutscher Verkehrs-Verlag, Hamburg, Oktober 2001.
- [38] Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft im Auftrag des Bundesministeriums für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft: Anpassung der deutschen Methodik zur rechnerischen Emissionsermittlung an internationale Richtlinien und Erfassung und Prognose der Ammoniak-Emissionen der deutschen Landwirtschaft und Szenarien zu deren Minderung bis zum Jahre 2010. Bonn: Oktober 2001.
- [39] Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik, TU München: Nawaro Datenbank. München, unveröffentlichte Datensammlung, Stand 2001.
- [40] Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten: Bayerischer Agrarbericht 2000. München: Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, 2000.

-
- [41] Bayerisches Landesamt für Statistik und Datenverarbeitung, Antwort auf E-Mail-Anfrage mit detaillierten Einschlagszahlen für Bayern. München, 2002.
 - [42] Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft: Statistischer Monatsbericht mit Futterwirtschaft 2/2001, Reihe Daten-Analysen. Frankfurt am Main: Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung, 2001.
 - [43] U. Fahl u.a.: Energieverbrauchsprognose für Bayern. Gutachten des Institutes für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung der Universität im Auftrag des Bayerischen Staatsministeriums für Wirtschaft, Verkehr und Technologie. Stuttgart, Mai 2000.
 - [44] NN: Einfluss von Forstwirtschaft, Landwirtschaft und Ernährung auf das Klima. Amt der Niederösterreichischen Landesregierung, St. Pölten, 1999.
 - [45] Statistisches Bundesamt: Brachflächen in Deutschland nach Bundesländern 1999 + 2000. Informationen aus der Internet-Homepage, Stand: 02/ 2003.

13 Anhang

13.1 Abkürzungen

A	Absolute Anzahl
a_{xy}	Relativer Anteil an einer Gesamtheit
a *)	Aufwandszahl
b *)	Bereitstellungsnutzungsgrad
BHKW	Blockheizkraftwerk
CH ₄	Methan
CO ₂	Kohlendioxid
CO ₂ ^{Äqu-phr}	Photosynthetisch reduziertes Kohlendioxid-Äquivalent, das aus der CO ₂ ^{phr} -Menge und CH ₄ - bzw. N ₂ O-Emissionen errechnet wird
CO ₂ ^{phr}	Photosynthetisch reduziertes Kohlendioxid, das die Photosynthese aus der Umwelt entnommen und als Kohlenstoff in der Pflanze abgelagert hat
EE	Endenergie
EFH	Einfamilienhaus
EnEV	Energie-Einspar-Verordnung
EPS	expandiertes Polystyrol
Ew	Einwohner
GJ	Gigajoule = 1*10 ⁹ Joule
HE	Hilfsenergie
I	Investitionen
j_{fix}	anteiliger jährlicher PE-Verbrauch bzw. CO ₂ (Äqu)-Ausstoß für Herstellung und Entsorgung
$j_{variabel}$	nutzungsbedingter jährlicher PE-Verbrauch bzw. CO ₂ -Ausstoß
k	Jährliche Kosten
KEA *)	Kumulierter Energieaufwand
KEA _E	Kumulierter Energieaufwand zur Entsorgung
KEA _H	Kumulierter Energieaufwand zur Herstellung
KEA _N	Kumulierter Energieaufwand zur Nutzung
k_{fix}	Jährliche Kapitalkosten der Investition
KLL	Kompaktleuchtstofflampe, auch „Energiesparlampe“ genannt
KNRA *)	Kumulierter Nicht-Regenerativer Aufwand
KRA *)	Kumulierter Regenerativer Aufwand
k_v	Spezifische Vermeidungskosten für Primärenergie oder Emissionen
$k_{variabel}$	jährliche Energie-, Hilfsenergie- und Wartungskosten, Gutschriften und Erlöse
L	Technische Lebensdauer
MFH	Mehrfamilienhaus
MJ	Megajoule = 1*10 ⁶ Joule
N ₂ O	Stickstoffdioxid (Lachgas)
NEV	Nichtenergetischer Verbrauch

Nm ³	Normkubikmeter
NT	Niedertemperatur
PE *)	Primärenergie
PS	Polystyrol
PUR	Polyurethan
PV	Photovoltaik
SEI	Stoffgebundener Energieinhalt
T€	Tausend Euro oder 1.000 €
TJ	Terajoule = 1*10 ¹² Joule
U-Wert	Wärmedurchgangskoeffizient in W pro m ² *K
WSVO	Wärmeschutzverordnung
z	Zinssatz
ZFH	Zweifamilienhaus

*) Definition auf der nächsten Seite

13.2 Definitionen

Aufwandszahl (a)	Kehrwert des Bereitstellungsnutzungsgrades (b)
Bereitstellungsnutzungsgrad (b)	Verhältnis der im Energieträger enthaltenen Energie zu allen primärenergetischen Aufwendungen ohne KRA, jedoch inklusive der Anlagen
direkte Emissionen/ Aufwendungen	Emissionen/ Aufwendungen, die am Ort des Energieverbrauchs entstehen, bezogen auf den unteren Heizwert
Endenergie (EE)	Nutzbarer Energieinhalt eines Stoffes oder eines Energieträgers
indirekte Emissionen/ Aufwendungen	Emissionen/ Aufwendungen, die bei der Gewinnung, der Herstellung und beim Transport des Energieträgers entstehen, bevor dieser beim Endverbraucher angelangt ist.
Kumulierter Energieaufwand (KEA)	Primärenergetisch bewertete Energieaufwendungen, die für die Herstellung, Nutzung und die Entsorgung eines ökonomischen Gutes entstehen bzw. zugewiesen werden können
Kumulierter Nicht-Regenerativer Aufwand (KNRA)	Summe der nichtregenerativen, d.h. nicht erneuerbaren/ fossilen Aufwendungen über der gesamten Lebensdauer (siehe KEA)
Kumulierter Regenerativer Aufwand (KRA)	Summe der regenerativen, d.h. erneuerbaren Aufwendungen über die Lebensdauer
Nutzungsgrad	Verhältnis von Nutzen zu Aufwand über einen bestimmten Zeitraum, meist ein Jahr
Primärenergie (PE)	Energieinhalt eines Stoffes, Gegenstandes oder Energieträgers inklusive der vorgelagerten Aufwendungen zur Herstellung
Wirkungsgrad	Verhältnis von Nutzen und Aufwand für einen bestimmten Moment

13.3 Vereinfachtes Verfahren zur Ermittlung des Jahres-Heizwärmebedarfs [13]

Zu ermittelnde Größen	Gleichung	Einheit	Bemerkung
Jahresheizwärmebedarf Q_h	$Q_h = 66 (H_T + H_V) - 0,95 (Q_s + Q_i)$	kWh	
Spezifischer Transmissionswärmeverlust H_T	$H_T = \sum (F_{xi} U_i A_i) + 0,05 A$	W/K	U_i : U-Wert des Bauteils A_i : Fläche des Bauteils F_{xi} : Temperaturkorrekturfaktor (siehe Tabelle)
Spezifischer Lüftungswärmeverlust H_V	$H_V = 0,19 \cdot V_e$	W/K	V_e : beheiztes Gebäudevolumen
Solare Gewinne Q_s	$Q_s = \sum (I_{s,j,HP} \cdot g_j \cdot A_j)$	kWh	g_j : Gesamtenergiedurchlassgrad A_j : Fensterfläche $I_{s,j,HP}$: Solare Einstrahlung (siehe Tabelle)
Innere Gewinne Q_i	$Q_i = 22 A_N$	kWh	A_N : Gebäudenutzfläche

Temperaturkorrekturfaktor:

Wärmestrom nach außen	F_{xi}
Außenwand, Fenster	1
Dach (als Systemgrenze)	1
Oberste Geschoßdecke (Dachraum nicht ausgebaut)	0,8
Abseitenwand	0,8
Wände und Decken zu ungeheizten Räumen	0,5
Unterer Gebäudeabschluß: - Kellerdecke - Fußboden auf Erdreich - Flächen gegen Erdreich	0,6

Solare Einstrahlung:

Orientierung	kWh/m ² *a
Südost bis Südwest	270
Nordwest bis Nordost	100
übrige Richtungen	155
Dachflächenfenster < 30°	225

13.4 Personenbelegung pro Quadratmeter Wohnfläche für Bayern im Jahr 2000

	EFH m ² /Pers.	ZFH m ² /Pers.	MFH m ² /Pers.	Sonstige m ² /Pers.
bis 1918	43,9	38,9	36,7	36,7
1919 - 1948	42,9	38,6	35,5	35,5
1949 - 1968	45,6	38,7	34,2	34,2
1969 - 1978	45,6	41,5	36,0	36,0
1979 - 1983	43,2	40,7	37,6	37,6
1984 - 1987	39,9	40,2	35,9	35,9
1988-1994	40,2	40,7	35,7	35,7
Neubau	40,2	40,7	35,7	35,7
Durchschnitt	43,8	39,4	36,0	36,0

13.5 Nutzungsgrade der installierten Wärmeerzeuger und Wärmeverteilungen

		EFH				
		bis 1978	1979-1983	1984-1987	1988-1994	1995-2000
Erdgas	$\eta_{\text{nenn, Wärmeerzeuger}}$	84,5%	85,0%	89,0%	92,2%	93,2%
	Bereitschaftsverluste	4,0%	2,5%	1,8%	1,5%	1,5%
	η_{Gesamt}	81,1%	82,9%	87,4%	90,8%	91,8%
	$\eta_{\text{Verteilung}}$	95,0%	95,0%	95,0%	95,0%	95,0%
Heizöl	$\eta_{\text{nenn, Wärmeerzeuger}}$	86,0%	86,5%	91,0%	93,0%	94,0%
	Bereitschaftsverluste	4,0%	2,5%	1,8%	1,5%	1,5%
	η_{Gesamt}	82,6%	84,3%	89,4%	91,6%	92,6%
	$\eta_{\text{Verteilung}}$	95,0%	95,0%	95,0%	95,0%	95,0%

		ZFH				
		bis 1978	1979-1983	1984-1987	1988-1994	1995-2000
Erdgas	$\eta_{\text{nenn, Wärmeerzeuger}}$	84,5%	84,5%	89,0%	92,2%	93,2%
	Bereitschaftsverluste	4,0%	2,5%	1,8%	1,5%	1,5%
	η_{Gesamt}	81,1%	82,4%	87,4%	90,8%	91,8%
	$\eta_{\text{Verteilung}}$	95,0%	95,0%	95,0%	95,0%	95,0%
Heizöl	$\eta_{\text{nenn, Wärmeerzeuger}}$	86,0%	86,5%	90,5%	92,7%	93,7%
	Bereitschaftsverluste	4,0%	2,5%	1,8%	1,5%	1,5%
	η_{Gesamt}	82,6%	84,3%	88,9%	91,3%	92,3%
	$\eta_{\text{Verteilung}}$	95,0%	95,0%	95,0%	97,0%	97,0%

		MFH				
		bis 1978	1979-1983	1984-1987	1988-1994	1995-2000
Erdgas	$\eta_{\text{nenn, W\ddot{a}rmeerzeuger}}$	85,0%	85,5%	89,8%	92,2%	93,5%
	Bereitschaftsverluste	3,0%	2,3%	1,4%	1,3%	1,3%
	η_{Gesamt}	82,5%	83,5%	88,5%	91,0%	92,3%
	$\eta_{\text{Verteilung}}$	95,0%	95,0%	95,0%	95,0%	95,0%
Heizöl	$\eta_{\text{nenn, W\ddot{a}rmeerzeuger}}$	86,5%	88,0%	91,3%	92,7%	94,0%
	Bereitschaftsverluste	3,0%	2,3%	1,4%	1,3%	1,3%
	η_{Gesamt}	83,9%	86,0%	90,0%	91,5%	92,8%
	$\eta_{\text{Verteilung}}$	95,0%	95,0%	95,0%	97,0%	97,0%

13.6 Spezifische Emissionsfaktoren der Energieträger

	vorgelagerte Emissionen			direkte Emissionen		
	CO ₂ g/kWh _{EE}	CH ₄ mg/kWh _{EE}	N ₂ O	CO ₂ g/kWh _{EE}	CH ₄ mg/kWh _{EE}	N ₂ O
Benzin	54,00	102,24	0,00	268,84	0,07	36,30
Biogas	1,13	62,56	3,81	0,00	14,82	6,17
Diesel	26,64	361,04	1,18	268,15	7,36	58,32
Erdgas	21,86	1.078,84	0,89	206,26	27,06	1,37
Fernwärme	0,00	0,00	0,00	189,00	578,58	7,95
Heizöl	9,06	301,19	0,67	300,23	30,39	2,44
Holz	28,58	2,05	0,06	6,76	25,20	25,20
Holz hackschnitzel	13,77	15,84	0,52	24,13	438,20	38,18
Holz pellets	22,22	35,29	0,83	51,13	149,58	16,18
Kohle	20,86	1.959,99	0,56	355,19	1.130,50	38,13
RME	85,96	113,32	60,34	0,00	289,92	58,73
Strom Mix Bayern	168,22	1.580,22	24,67	0,00	0,00	0,00
Strom Mix BRD	646,52	1.580,22	24,67	0,00	0,00	0,00

13.7 Aufwandszahlen der Energieträger

	a=(1/b-1) vorgelagert		a=(1/b-1) Vor-Ort	
	NRA	RA	NRA	RA
Benzin	1,00	0,00	0,16	0,00
Biogas	0,00	1,00	0,00	0,00
Diesel	1,00	0,00	0,12	0,00
Erdgas	1,00	0,00	0,12	0,00
Fernwärme	1,00	0,00	-0,20	0,00
Heizöl	1,00	0,00	0,11	0,00
Holz	0,00	1,00	0,03	0,00
Holz hackschnitzel	0,00	1,00	0,03	0,00
Holz pellets	0,00	1,00	0,03	0,00
Kohle	1,00	0,00	0,05	0,00
RME	0,00	1,00	0,64	0,66
Strom Mix	1,00	0,00	1,92	0,00

13.8 Rahmendaten der Wirtschaftlichkeitsrechnung

Zinssatz 6 %

Abschreibung über die gesamte technische Lebensdauer der Maßnahme

Typgebäude für MFH

Baualtersklasse		vor 1918	1918 bis 1948	1949 bis 1968	1969 bis 1978	1979 bis 1983	1984 bis 1987	1988 bis 1994	Neu- bau	
Abmessungen	Wohnungen	Anzahl	6,0	5,0	8,5	8,2	6,5	7,0	6,9	7,0
	Bewohner	Anzahl	11,6	9,2	15,5	15,6	12,8	12,9	12,9	13,1
	Wohnfläche	m ²	425,4	326,6	532,3	561,0	481,0	462,5	458,4	467,0
	Dach	m ²	.	147,0	0,0	187,4	0,0	218,3	216,4	294,2
	Dachboden	m ²	154,0	0,0	190,6	0,0	197,2	0,0	0,0	0,0
	Fläche AW ohne HK-Nischen	m ²	476,0	293,9	399,2	387,1	360,8	189,6	187,9	406,3
	Fläche AW HK-Nischen	m ²	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Außenwand	m ²	476,0	293,9	399,2	387,1	360,8	189,6	187,9	406,3
	Kellerwand	m ²	99,3	85,5	110,4	109,5	111,0	100,5	100,0	137,2
	Kellerboden	m ²	154,0	114,3	190,6	187,4	192,4	157,7	156,3	294,2
	Kellerdecke	m ²	154,0	114,3	190,6	187,4	192,4	157,7	156,3	294,2
	Fläche Fenster	m ²	80,8	60,7	93,1	88,1	80,3	87,9	87,1	95,7
U-Werte	Dach	W/m _B ² K	0,00	0,44	0,00	0,78	0,00	0,37	0,37	0,25
	Dachboden	W/m _B ² K	0,37	0,00	0,65	0,00	0,34	0,00	0,00	0,00
	Fläche AW ohne HK-Nischen	W/m _B ² K	1,30	0,92	1,20	1,15	0,80	0,67	0,67	0,45
	Fläche AW HK-Nischen	W/m _B ² K	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Außenwand	W/m _B ² K	1,30	0,92	1,20	1,15	0,80	0,67	0,67	0,45
	Kellerwand	W/m _B ² K	1,30	0,92	1,20	1,15	0,80	0,67	0,67	0,45
	Kellerboden	W/m _B ² K	1,30	0,92	1,20	1,15	0,80	0,67	0,67	0,45
	Kellerdecke	W/m _B ² K	1,25	1,30	1,40	0,85	0,54	0,38	0,37	0,34
	Fläche Fenster	W/m _B ² K	3,00	2,83	2,74	3,00	2,60	2,59	2,58	1,40
Energetische Kenngrößen	A/V	1/m	0,35	0,39	0,45	0,45	0,51	0,54	0,54	0,51
	JHW-Bedarf	kWh/m ² *a	197	154	157	142	114	88	79	80
	Normwärmebedarf	W/m ²	105	83	85	80	65	50	45	45
	Jahresstrombedarf	kWh/a	11.073	8.934	15.121	14.966	12.148	12.506	12.425	12.640
	Wärmeleistungsbedarf	kW	44,7	27,1	45,2	44,9	31,3	23,1	20,6	21,0
	Heizwärmebedarf	kWh/a	83.779	50.200	83.324	79.806	54.740	40.725	36.018	37.311
	Heizungsvollaststunden	h	1.876	1.852	1.842	1.778	1.751	1.761	1.746	1.775
	Warmwasserbedarf	kWh/a	6.840	5.433	9.173	9.196	7.548	7.603	7.584	7.727
	Verteilungsverluste WW	kWh/a	9.522	7.562	12.769	12.801	10.508	10.584	10.558	10.756
	Speicherverluste WW	kWh/a	678	565	961	927	735	791	780	791