

Ökologische Betrachtungen regenerativer Energien

- Vergleichende Ökobilanzen und weitere Umweltaspekte -

Dr. J. Moerschner

Institut für Energiewirtschaft und rationelle Energieanwendung
Universität Stuttgart

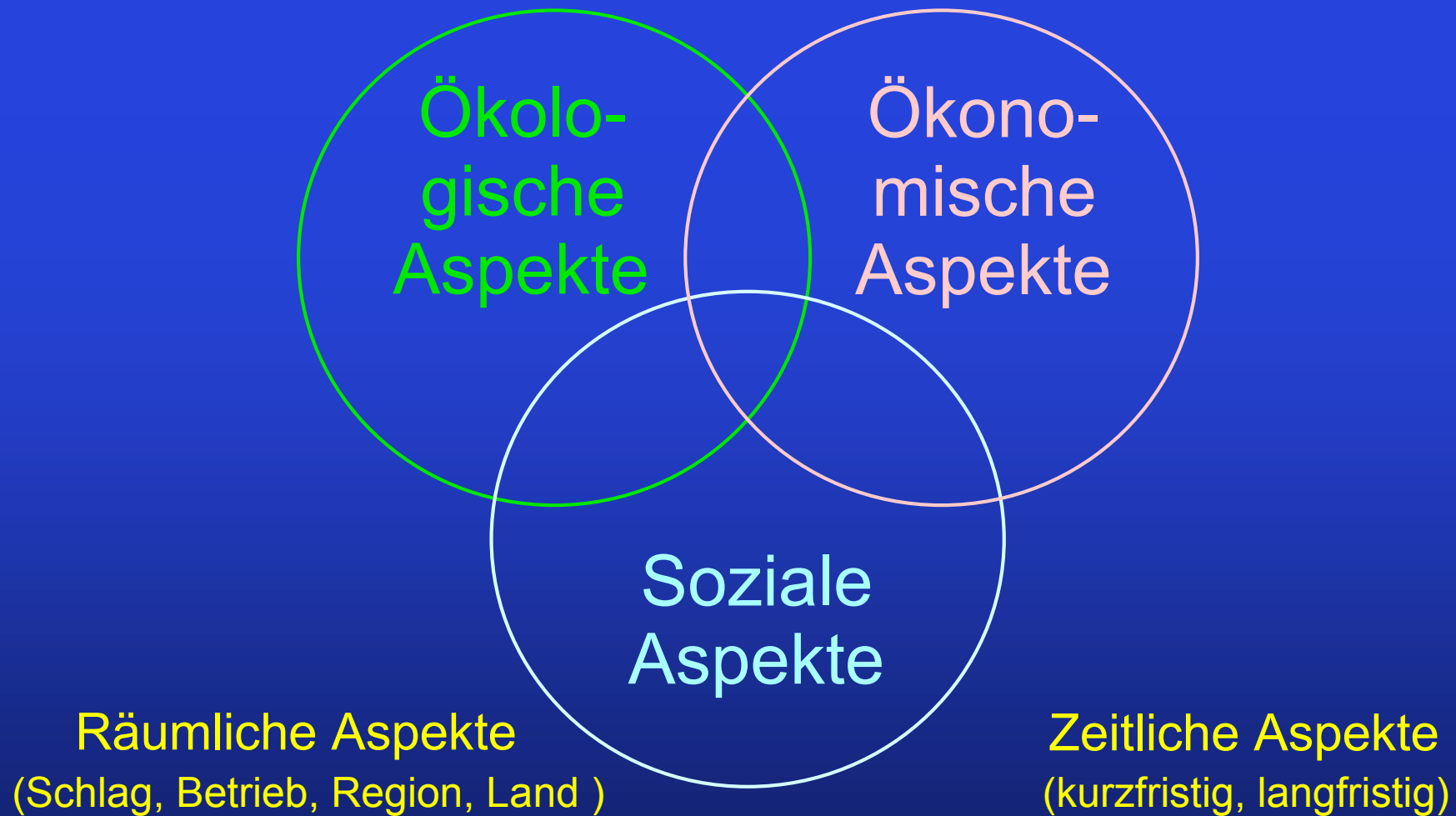
**Vortrag im Rahmen der Vorlesung
„Regenerative Energien“
am Institut für Agrartechnik der G.A.-Universität Göttingen**

am 03.02.2003

Thematische Gliederung

- **Einführung**
- **Umweltbewertungsinstrumente**
- **Vorgehensweise bei der Erstellung von Ökobilanzen**
- **Ausgewählte Ergebnisse**
- **Fazits**

Dimensionen der Nachhaltigkeit



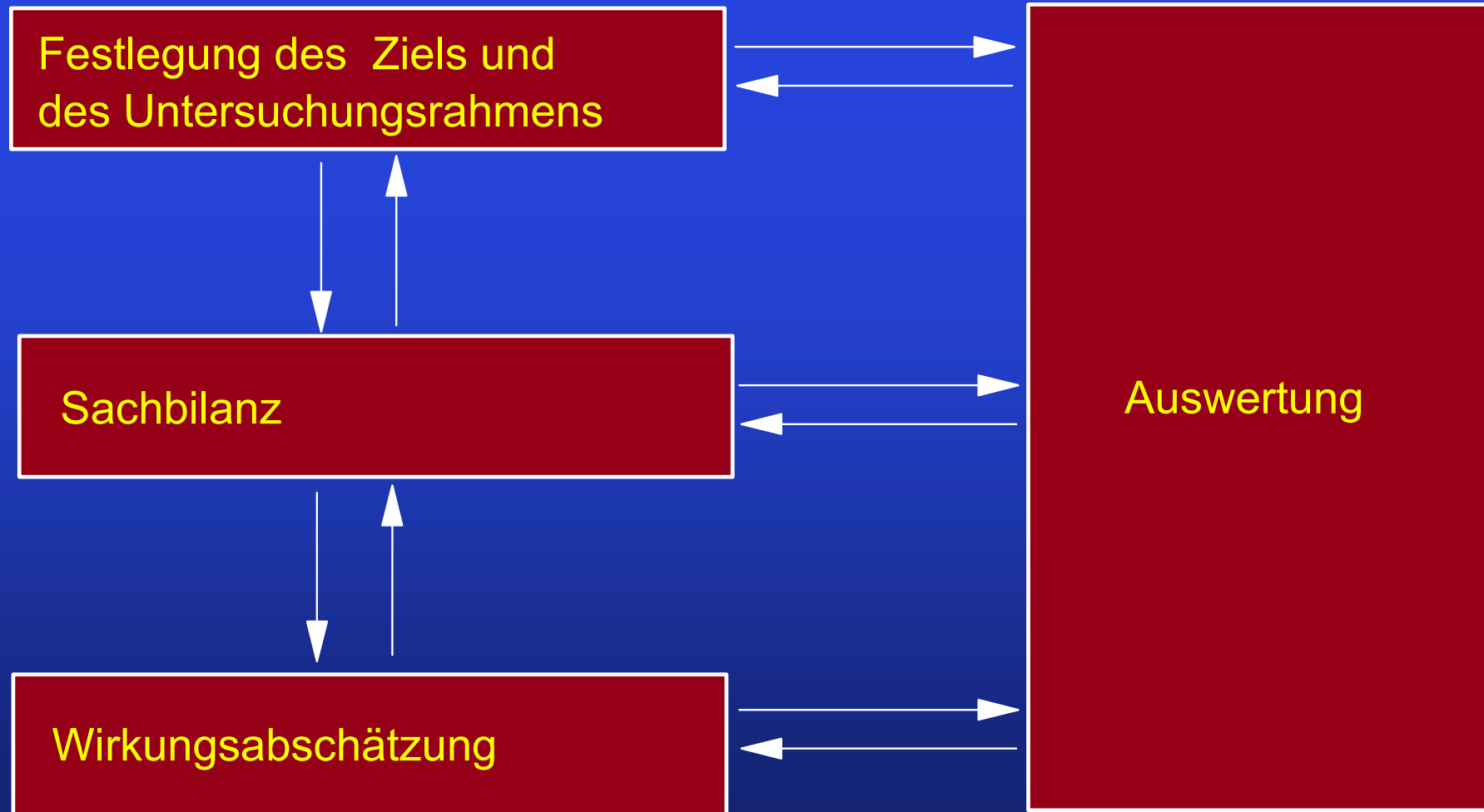
Definition der Brundtland-Kommission (1987)

Sustainable development is development that meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs.

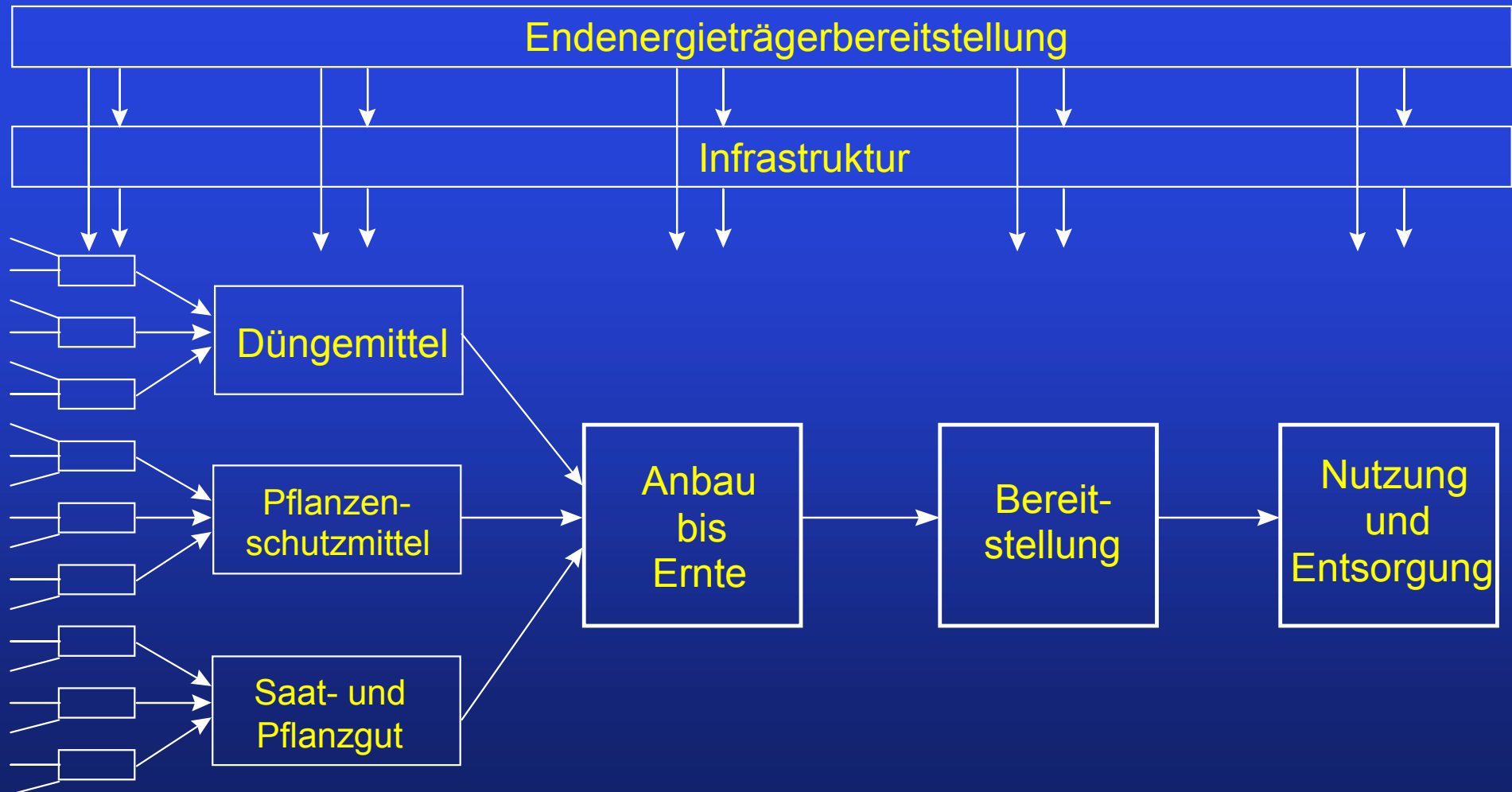
Ausgewählte Umweltbewertungsinstrumente

	Bilanzierungsobjekt und -tiefe	Dimensionen
Technikfolgenabschätzung	Technik / Technologie	Ökologie, Ökonomie, Soziales
Umweltverträglichkeitsprüfung	Einzelprojekt / Anlage	Ökologie
Ökoaudit	Produktionsstätte	Ökologie
Produktlinienanalyse	Produkt (gesamter Lebensweg)	Ökologie, Ökonomie, Soziales
Ganzheitliche Bilanzierung	Produkt (gesamter Lebensweg)	Ökologie, Ökonomie
Ökobilanz	Produkt (gesamter Lebensweg)	Ökologie

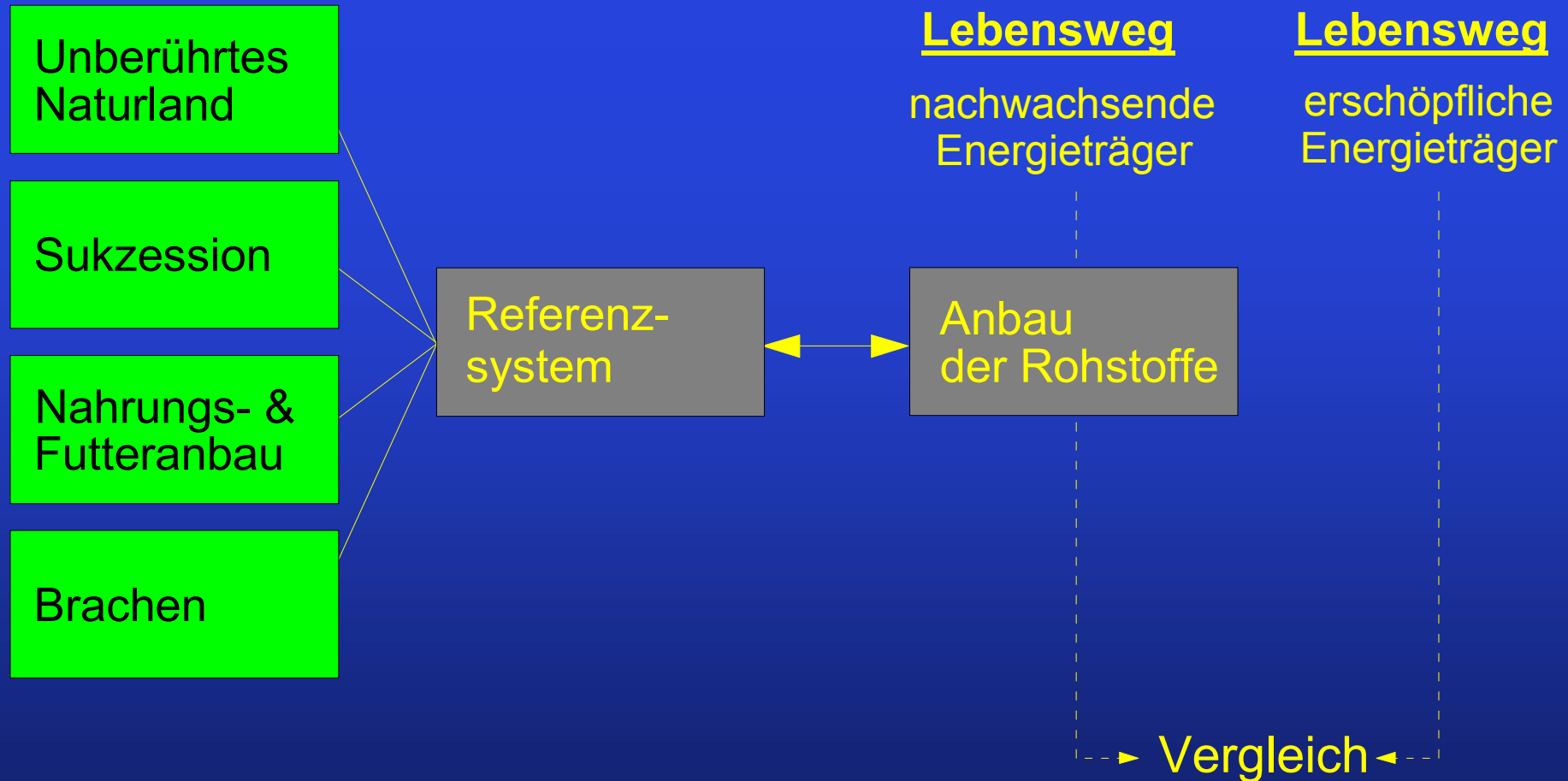
Elemente einer Ökobilanz



Prozesskettenanalyse (Lebenswegbetrachtung)

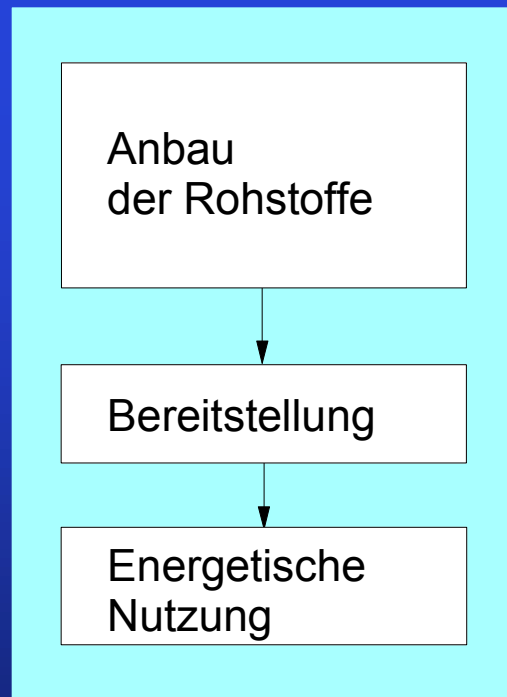


Mögliche Referenzsysteme

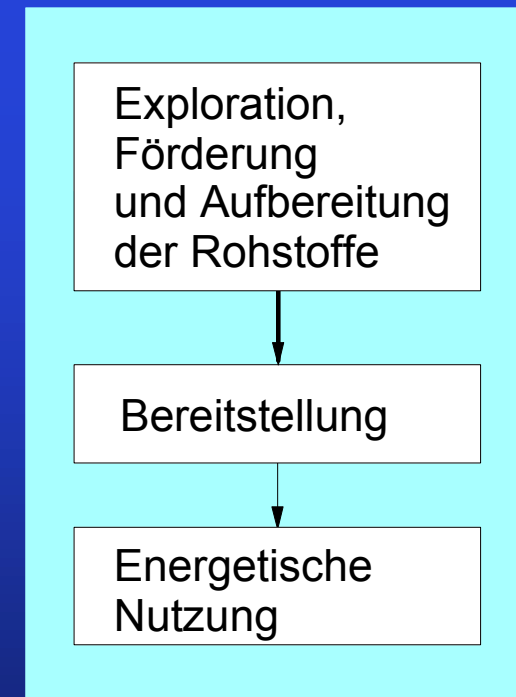


Vergleich unterschiedlicher Systeme

Variante 1
(z. B. nachwachsende
Energieträger)



Variante 2
(z. B. fossile
Energieträger)



Datenbeispiel für eine ORC-Anlage, 1 MW_{el}

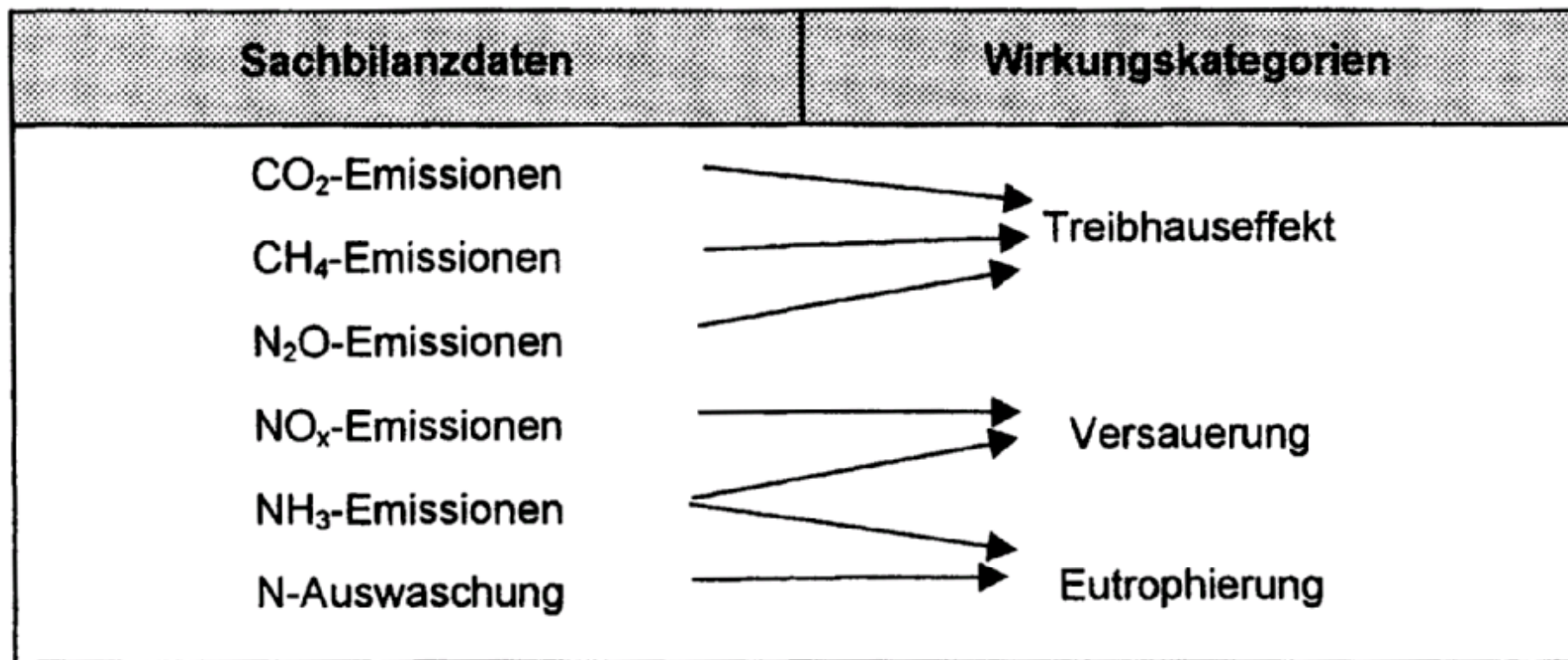
Anz.	Anlagenbezeichnung	Länge	Breite, bzw. Ø	Höhe	Masse/ Stck	Bemerkung
		[mm]	[mm]	[mm]	[kg]	
1	Holzessel (Kohlbach)	8.270	3.060	6.250	96.000	Leergewicht
1	Thermoölkessel		3.500	7.300	20.000	Leergewicht
1	Thermoöl im Kessel				6.000	
	Summe Thermoölkessel				130.000	gerundet
1	Thermoöl-Eco				10.000	Betriebsgew.
1	Warmwasser-Eco				2.000	Betriebsgew.
1	Kompaktgeh. Ecos	3.200	2.000	7.500		
1	LUVO	2.500	1.150	6.200	2.500	Betriebsgew.
1	Multizyklon	2.600	1.500	4.200	3.000	
1	Elektrofilter	7.000	4.400	11.500	25.000	Betriebsgew.
1	Rauchgasventilator/Haube	2.700	1.760	2.700	3.500	Betriebsgew.
1	Druckluftspeicher		1.600	5.570	2.500	Betriebsgew.
1	Hilfskühler	3.000	1.600	1.200	6.000	Betriebsgew.
1	Sammelgefäß Thermoöl	5.500	1.600		12.000	Betriebsgew.
1	Ausdehnungsgefäß	2.400	1.600		6.000	Betriebsgew.
1	Wärmetauscher Thermoöl	3.000	650	900	2.000	Betriebsgew.

Standardliste der Umweltwirkungskategorien, die bei Ökobilanzen Berücksichtigung finden (nach DIN-NAGUS)

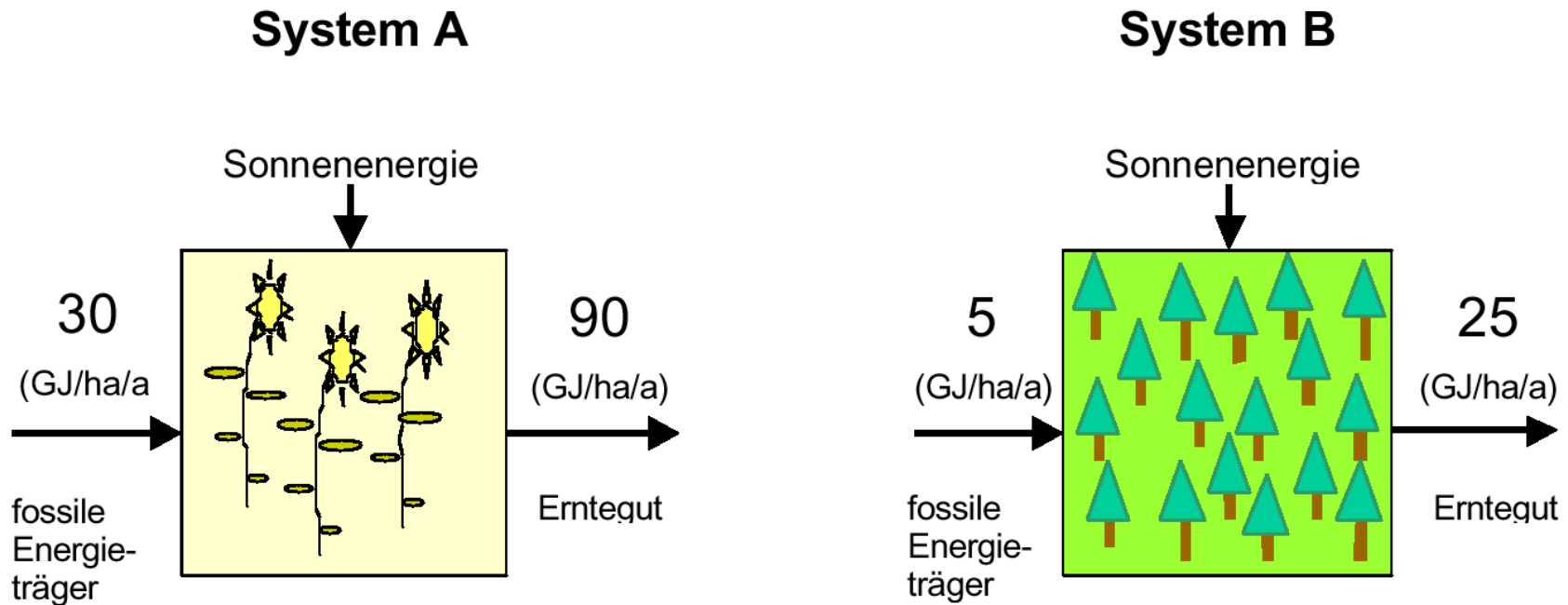
- 1. Ressourcenverbrauch**
- 2. Naturraumbeanspruchung**
- 3. Treibhauseffekt**
- 4. Ozonabbau**
- 5. Versauerung**
- 6. Eutrophierung**
- 7. Ökotoxizität**
- 8. Humantoxizität**
- 9. Sommersmog (Photosmog)**
- 10. Lärmbelastung**

Beispiele für die Klassifizierung von Sachbilanzdaten:

- Zuordnung von Sachbilanzdaten zu Wirkungskategorien -



Effizienzbewertung in Ökobilanzen



	System A	System B
Input / Outputverhältnis	1:3	1:5
Nettoenergiegewinn (GJ/ha/a)	60	20

Software Balance 3.1



“Main Database”

- Sachbilanz-, Wirkungs-, Bewertungsgrößen
- I-O-Daten (Tabellen, Sachbilanzkoeffizienten)
- Module, z. B. für:
 - Energieträger
 - Materialien
 - Transporte
 - Abfallentsorgung
 - ...

“Study Database”

- Auswahl der Sachbilanzgrößen für Studie
- Definition eigener Module
- Auswahl von Modulen aus Hauptdatenbank
- Grafikunterstützte Bilanzanalyse
- Speicherung von nutzerspezifischen Einstellungen

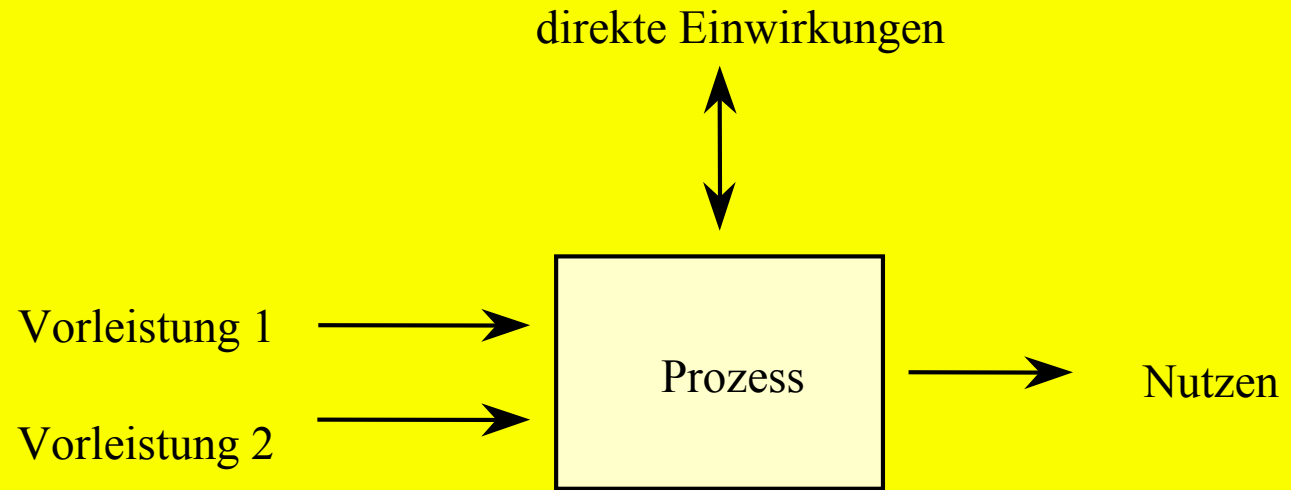
“I/O-Table Database”

- Definition der Sektoren
- Sektorale Vorleistungen
- sektorale Parameter, z. B.:
 - Energienutzung
 - Abfallaufkommen
 - ...
- Emissionsfaktoren
- Sachbilanzkoeffizienten

BALANCE – schrittweise Bilanzerstellung (1)

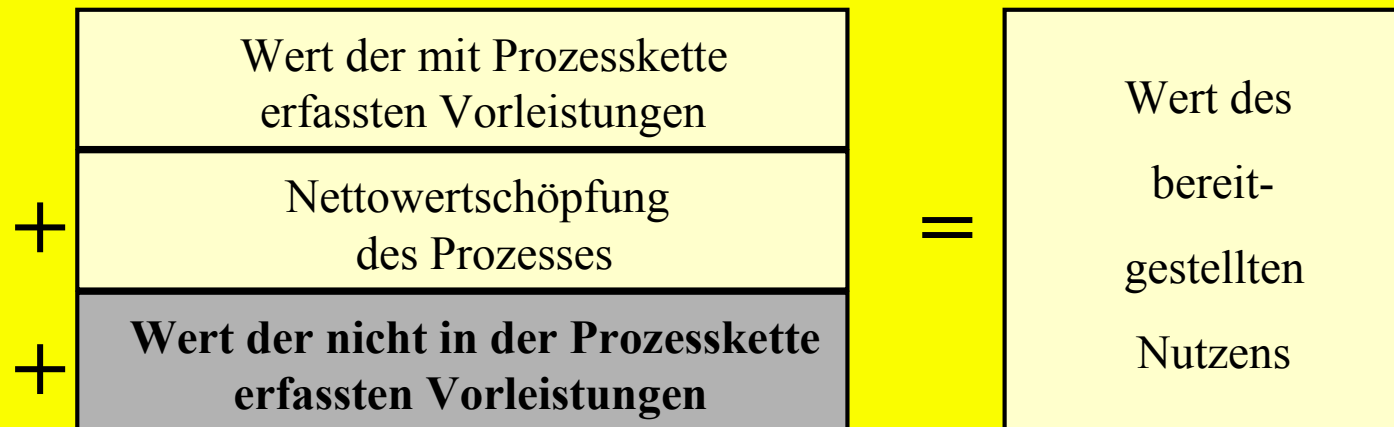
①

Erstellen der Prozesskette (Stoff- und Energiebilanzen für modellierte Prozesse



②

Monetäre Bilanz für jeden Prozess der Prozesskette



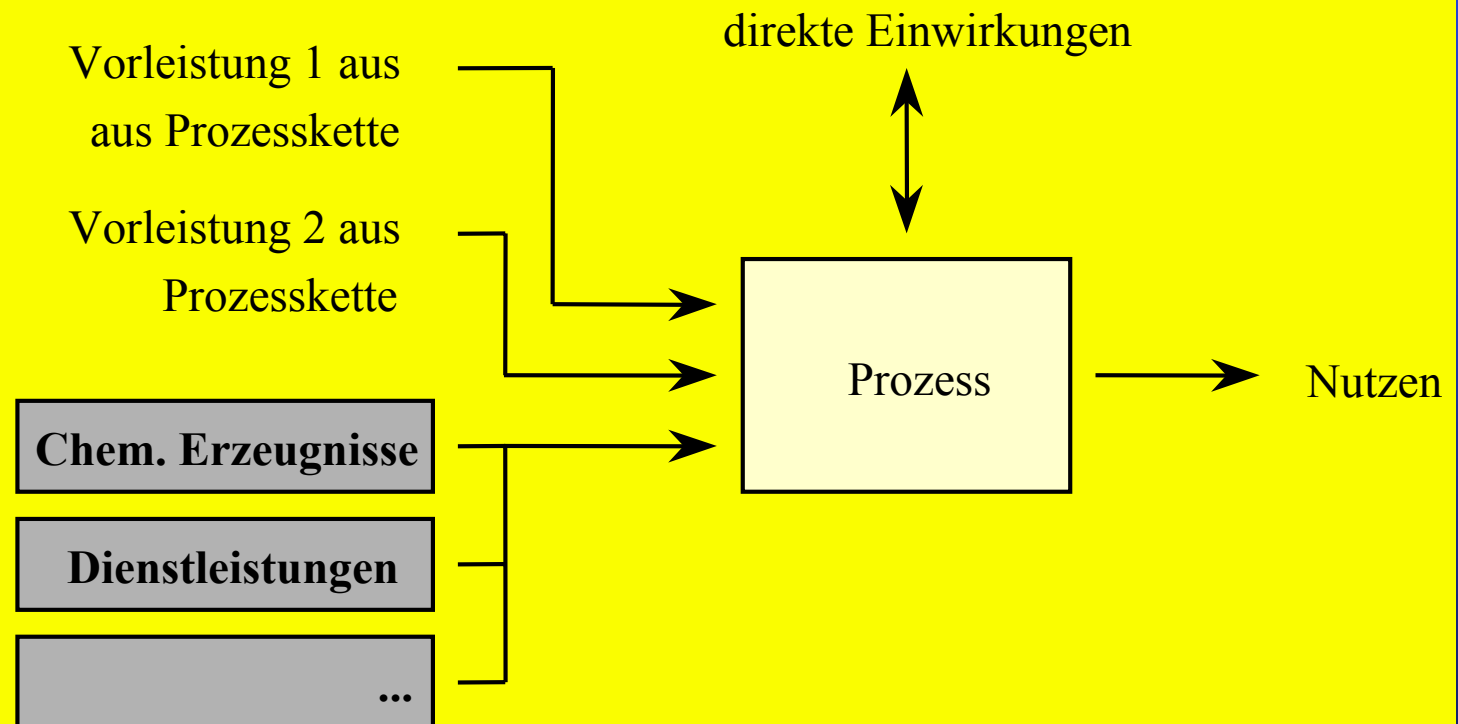
BALANCE – schrittweise Bilanzerstellung (2)

①

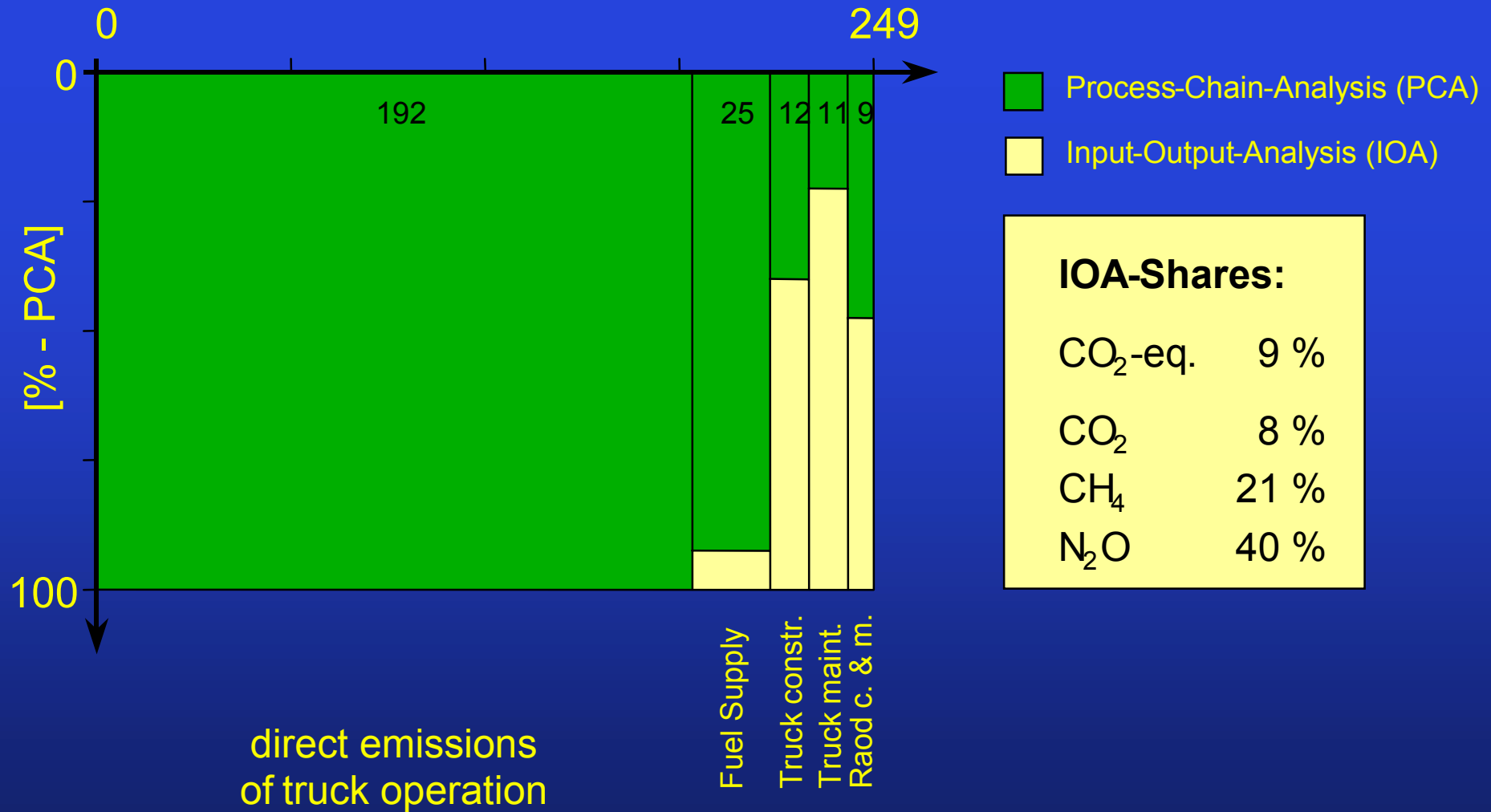
②

③

Zuordnung des Wertes der nicht in den Prozessketten erfassten Vorleistungen zu Sektoren der Input-Output-Tabelle und Bilanzierung über Input-Output-Analyse



Hybrid-Bilanz für ein Gütertransportverfahren (kg CO₂-Äquiv.)





Analysis Quantity - Show Data

 Sort by Quantity

Close

Level	Short Name	Unit	Quantity	% of Total
1	1 TJ Wärme	MJ	0	0
2	Solaranlage, 20 a	MJ	0	0
3	Bau Solaranlage	MJ	214450,3	53,22
3	Betrieb	MJ	0	0
3	Abriß	MJ	7828,204	1,94
4	Strom NS Öst in kWh	MJ	39595,073	9,83
4	Strommix Solarthermie	MJ	57855,814	14,36
4	Instandhaltung	MJ	83194,348	20,65

- Inventory
 Impact
 Evaluation

KEA in kWh - Ressourcenmethode
 Treibhauspotenzial 100 Jahre
 Versauerungspotenzial
KEA in MJ - Ressourcenmethode

Total

402923,739

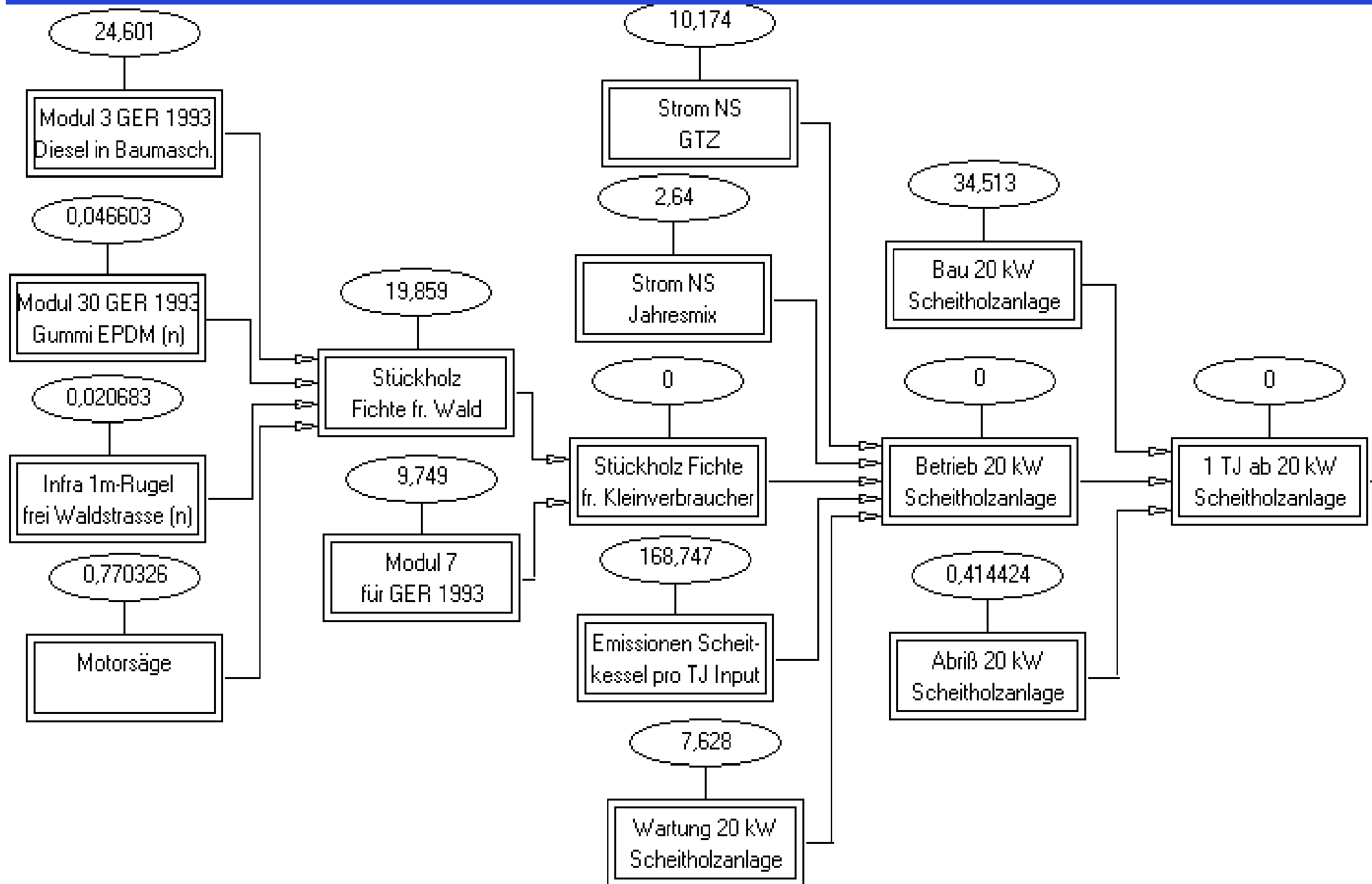
Show Graph

Significant issues

1 TJ

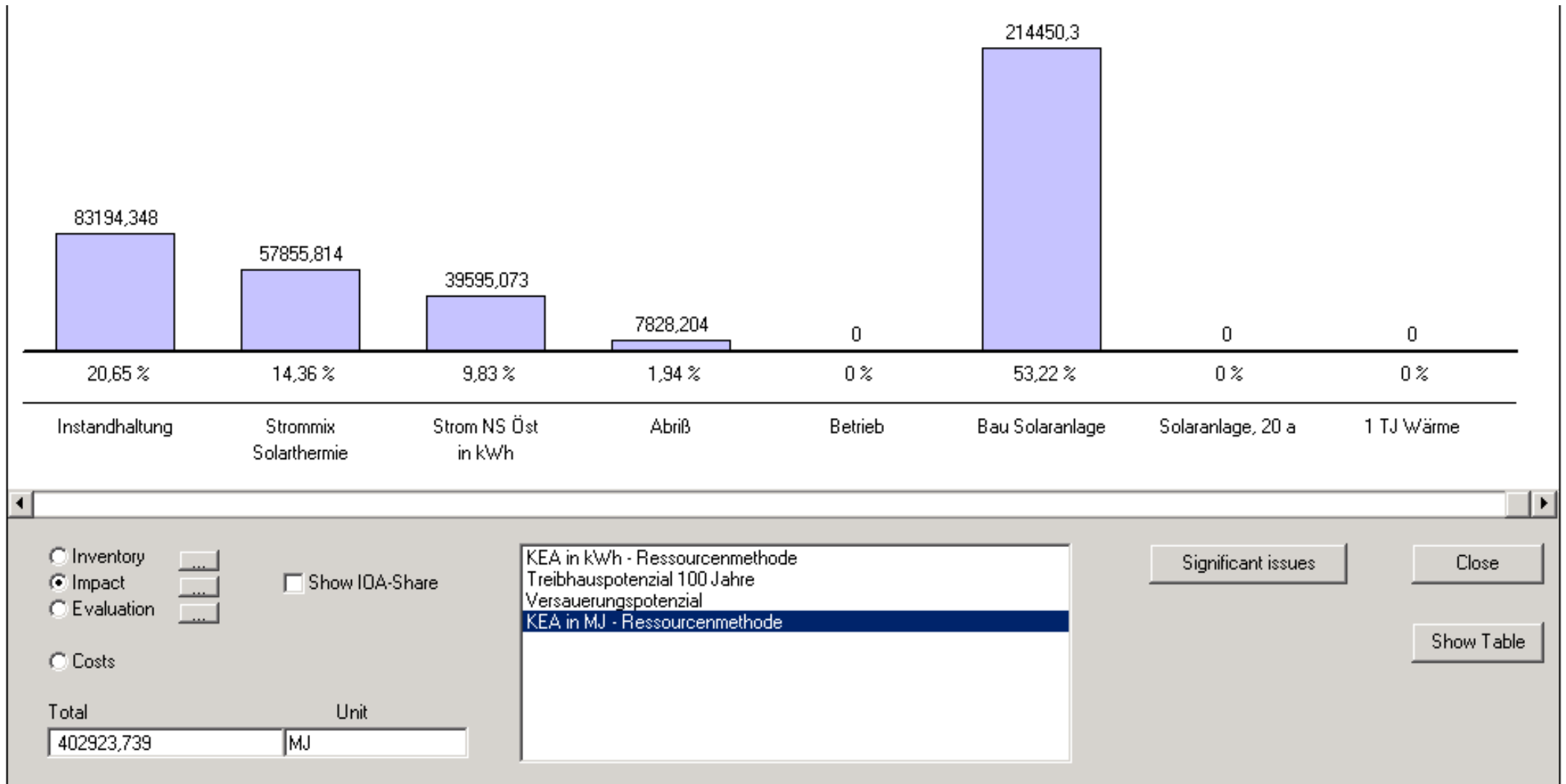
Auswertungsmöglichkeiten innerhalb von BALANCE (1)

- grafische Prozessübersicht, Beispiel Scheitholz -



Auswertungsmöglichkeiten innerhalb von BALANCE (2)

- grafische Darstellung der Impactverteilung, Bsp. Solarwärme -



Auswertungsmöglichkeiten innerhalb von BALANCE (3)

- tabellarische Darstellung der Impactverteilung, Bsp. Solarwärme -

Sort by Quantity

Close

Level	Short Name	Unit	Quantity	% of Total
1	1 TJ Wärme	MJ	0	0
2	Solaranlage, 20 a	MJ	0	0
3	Bau Solaranlage	MJ	214450,3	53,22
3	Betrieb	MJ	0	0
3	Abriß	MJ	7828,204	1,94
4	Strom NS Öst in kWh	MJ	39595,073	9,83
4	Strommix Solarthermie	MJ	57855,814	14,36
4	Instandhaltung	MJ	83194,348	20,65

- Inventory
- Impact
- Evaluation

KEA in kWh - Ressourcenmethode
 Treibhauspotenzial 100 Jahre
 Versauerungspotenzial
KEA in MJ - Ressourcenmethode

Total

402923,739

Show Graph

Significant issues

Ergebnisse

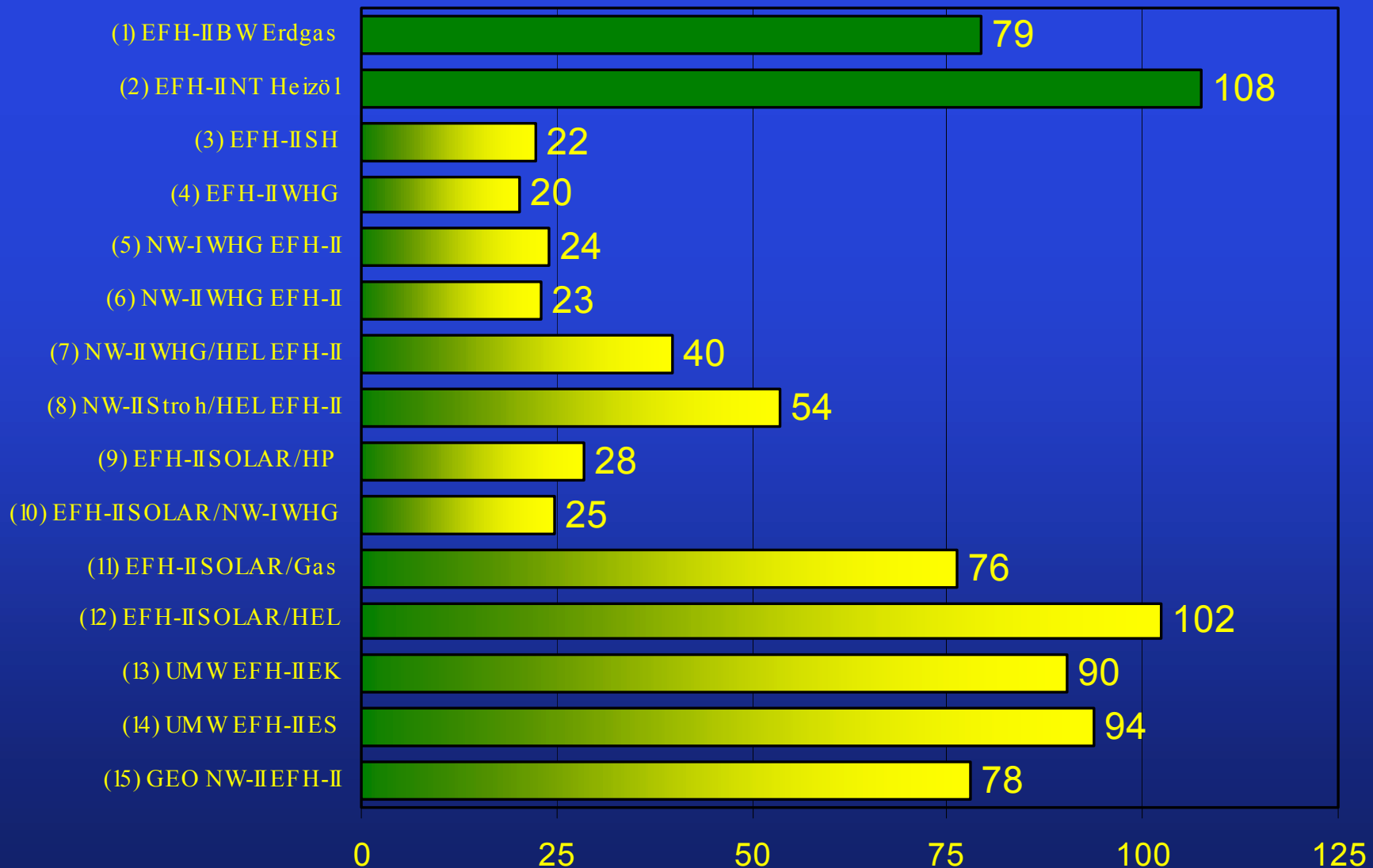
FNR-Studie

Bioenergie im Vergleich zu den übrigen Erneuerbaren

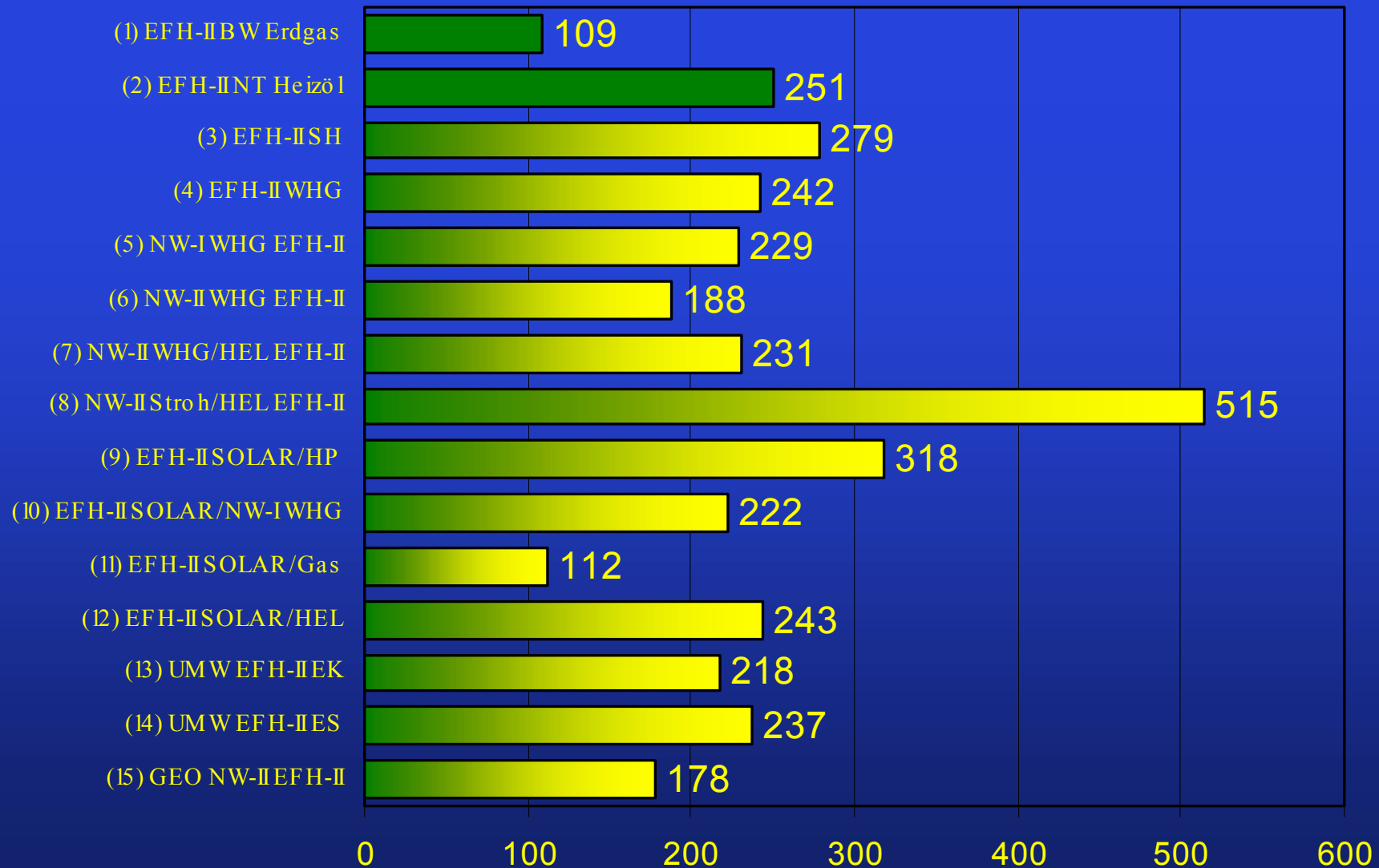
- **Regenerative Energien im Vergleich zu mit fossilen Energieträgern befeuerten Lösungen**
 - ☞ **Wärme**
 - ☞ **Treibstoffe**
 - ☞ **Strom**

- **Betrachtete Umweltgrößen:**
 - ☞ **Nicht erneuerbarer Primärenergieeinsatz**
 - ☞ **Treibhausgasemissionen**
 - ☞ **Emissionen mit versauernder Wirkung**
 - ☞ **Emissionen mit Human- und ökotoxikologischer Wirkung**
 - Stickstoffoxid (NO_x)
 - Schwefeldioxid (SO₂)

Wärmebereitstellung aus regenerativen Energien - Treibhausgasemissionen (t CO₂-Äquivalent/TJ_{Nutz}) -

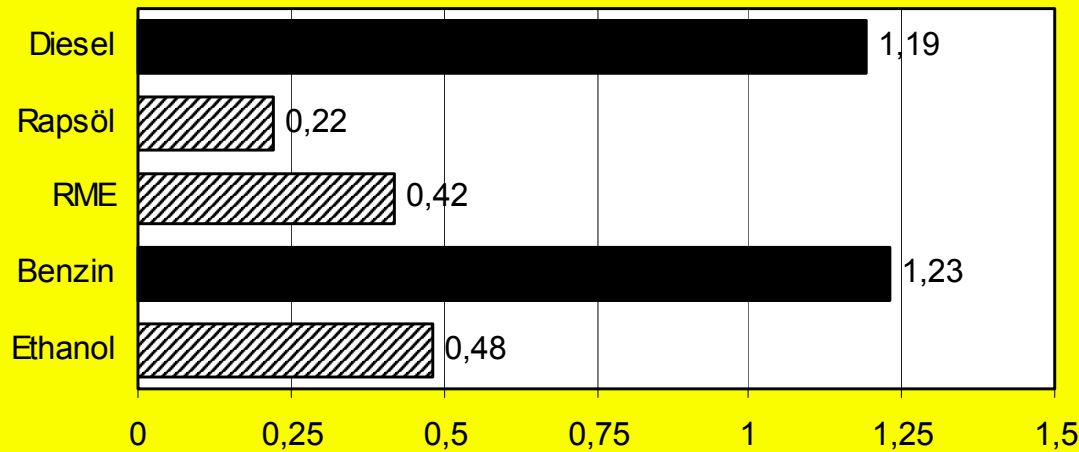


Wärmebereitstellung aus regenerativen Energien - Emissionen mit versauernder Wirkung (kg SO₂-Äquivalent/TJ_{Nutz}) -



Treibstoffe aus regenerativen Energien - Primärenergieaufwand -

A - Primärenergieaufwand [TJ_{Prim}/TJ_{Hu}]



Treibstoffbereitstellung

A - Primärenergieaufwand [$kWh_{Prim}/1000$ Pkw-km]

Treibstoffbereitstellung und Nutzung

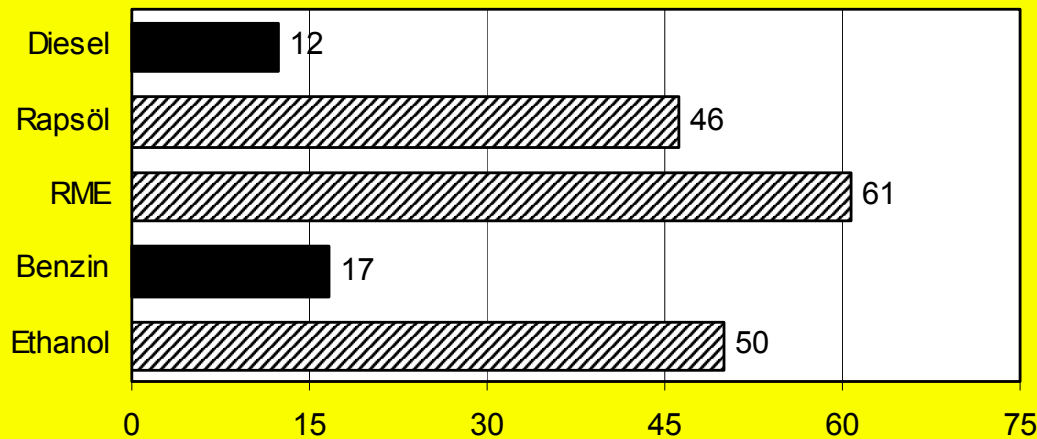


Treibstoffe aus regenerativen Energien - Treibhausgasemissionen -

B - Treibhausgasemissionen

[t CO₂-Äquiv./TJ_{Hu}]

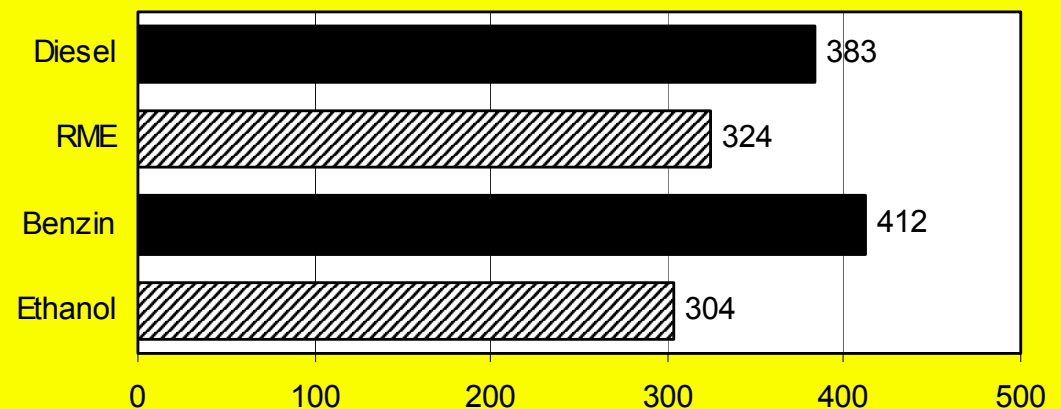
Treibstoffbereitstellung



**Treibstoffbereitstellung
 und Nutzung**

B - Treibhausgasemissionen

[kg CO₂-Äquiv./1000 Pkw-km]

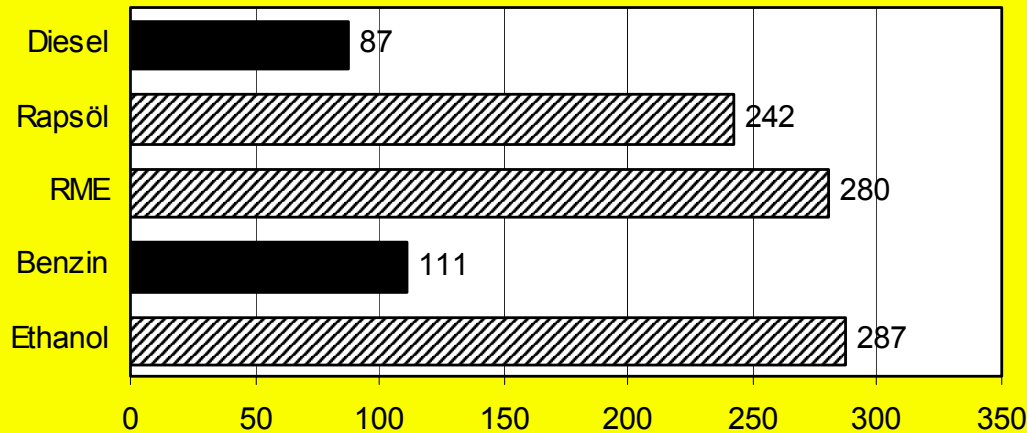


Treibstoffe aus regenerativen Energien - Emissionen mit versauernder Wirkung -

C - Emissionen mit versauernder Wirkung

[kg SO₂-Äquiv./TJ_{Hu}]

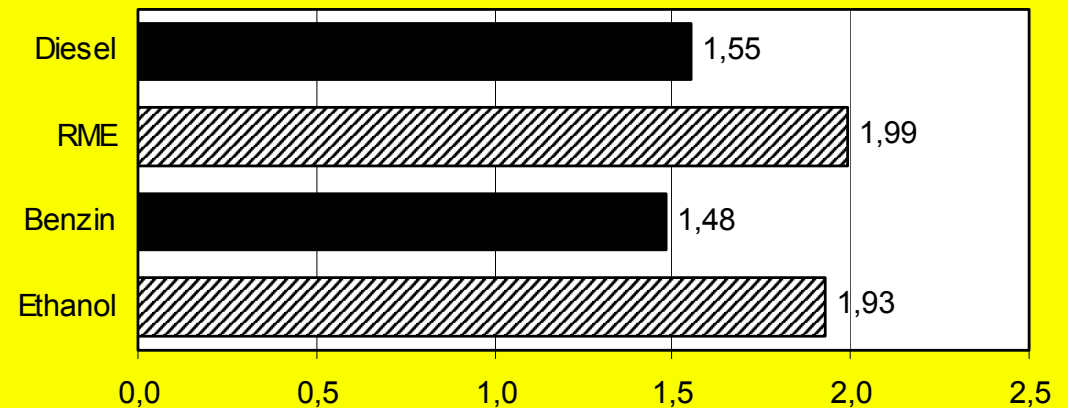
Treibstoffbereitstellung



C - Emissionen mit versauernder Wirkung

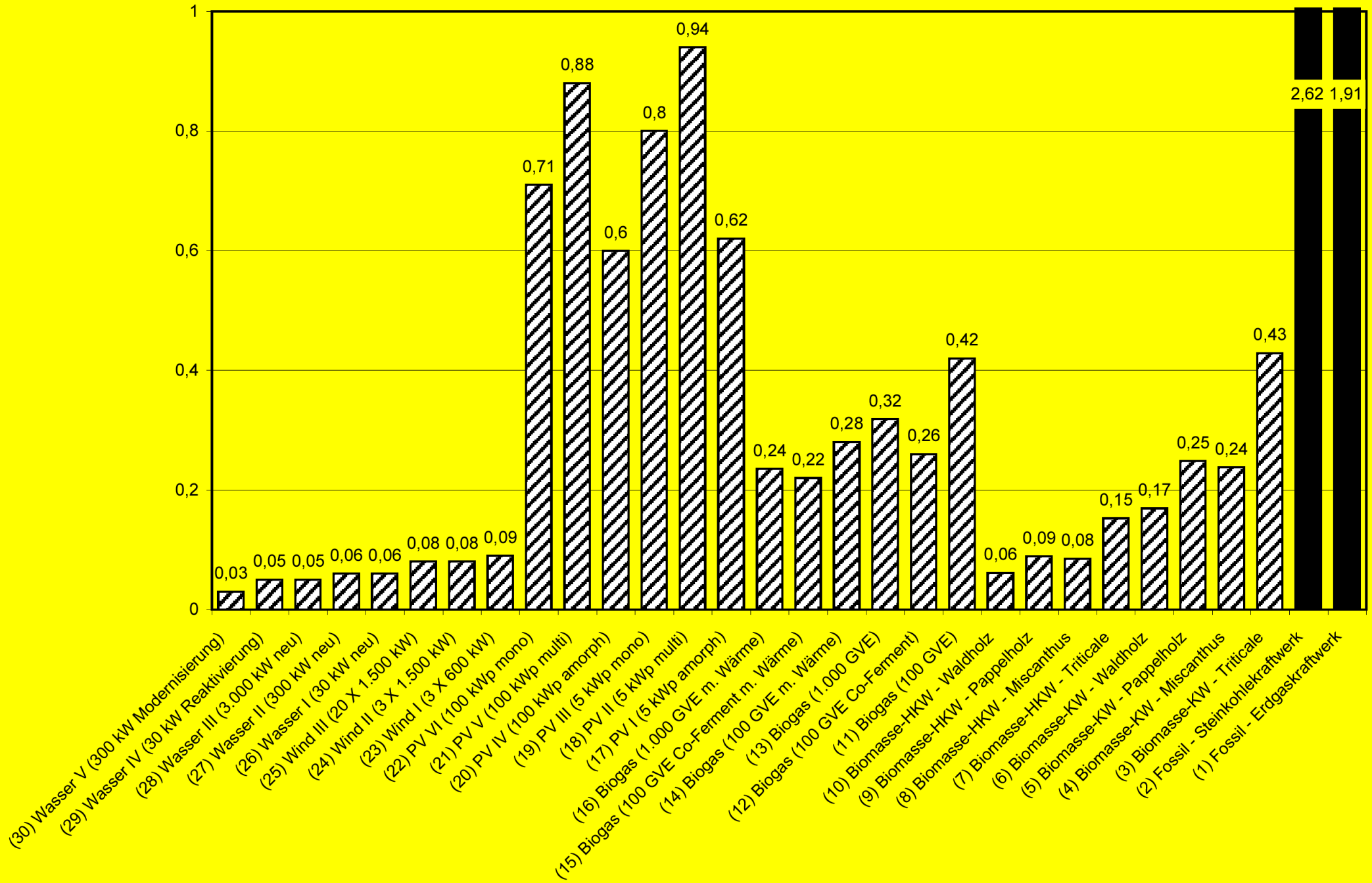
[kg SO₂-Äquiv./1000 Pkw-km]

**Treibstoffbereitstellung
 und Nutzung**



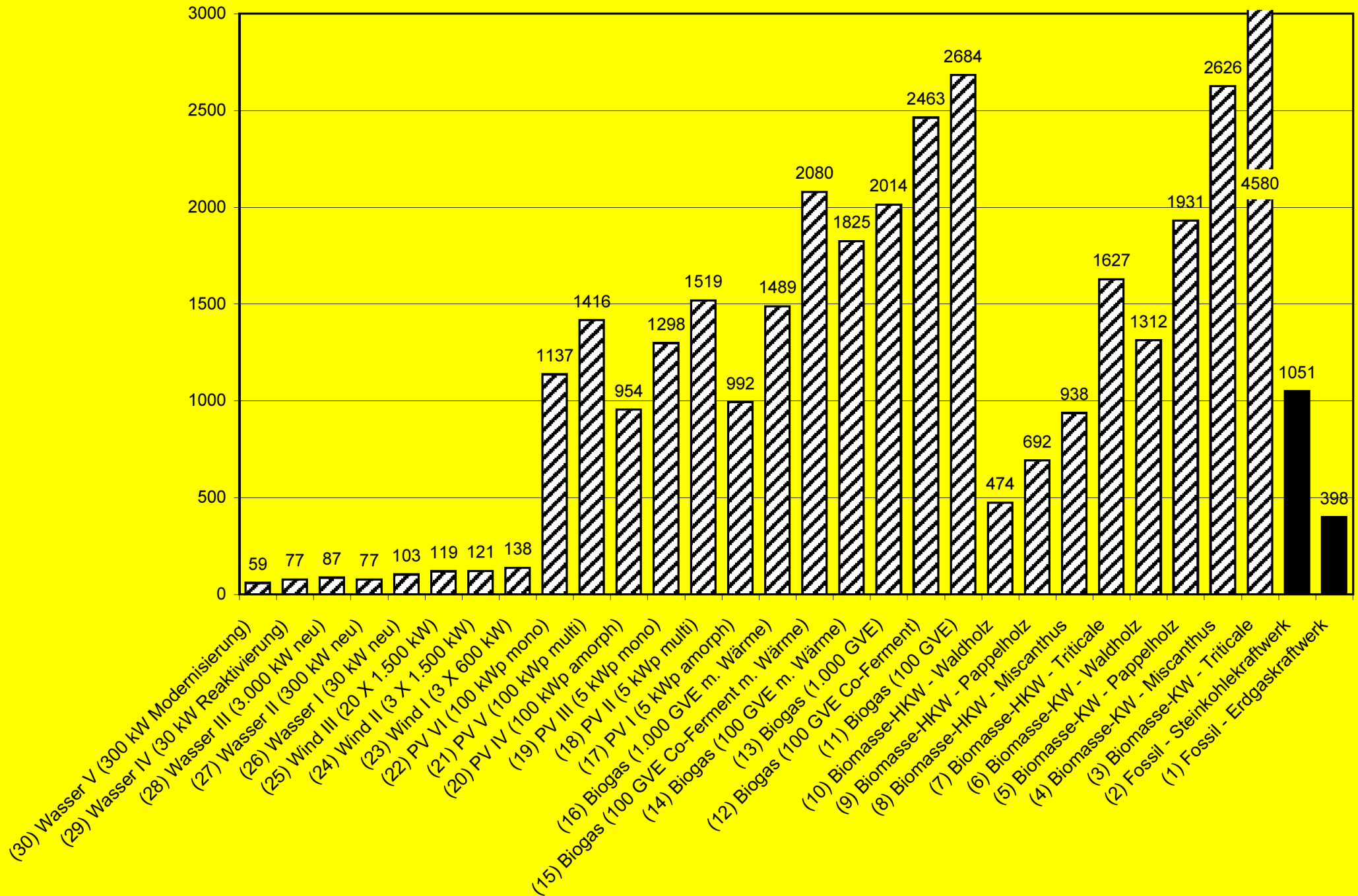
Strom aus regenerativen Energien

- Primärenergieaufwand ($\text{GWh}_{\text{Prim}}/\text{GWh}_{\text{Nutz}}$) -



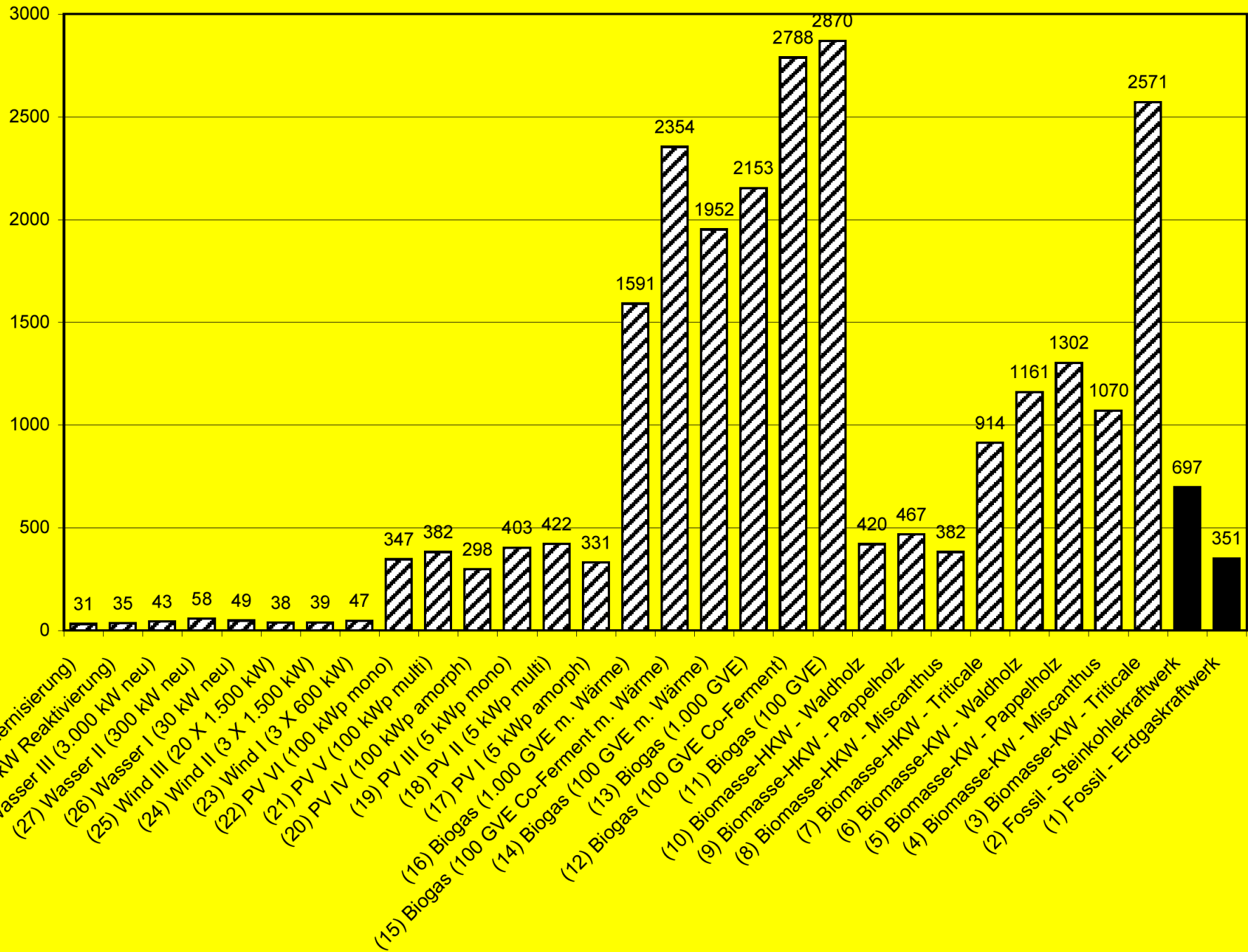
Strom aus regenerativen Energien

- Emissionen mit versauernder Wirkung (kg SO₂-Äquiv./GWh_{Nutz}) -



Strom aus regenerativen Energien

- Stickstoffoxidemissionen (kg NO_x/GWh_{Nutz}) -



Biomasse: Weitere Umweltaspekte - Anbau und Ernte der Rohstoffe -

- **Erosion**
- **Bodenverdichtung**
- **Humuserhalt**
- **Beitrag zur Gülleverwertung**
- **Toleranz gegenüber Unkräutern, Ungräsern und Krankheiten**
- **Pflanzenschutzmittelanwendung**
- **Biodiversität**
- **Nährstoffeintrag in Grundwasser und Gewässer**
- **N₂O-Emissionen**
- **Beitrag zur Kulturlandschaft und zum Erholungswert**
- **Wasserverbrauch**
- **Spezifischer Flächenbedarf**
- **Spezifischer Stickstoffbedarf**

Biomasse: Weitere Umweltaspekte - Aufbereitung und Bereitstellung -

- **Transport: Verkehrsweegebelastung, abhängig von**
 - ☞ **Transportform (Ballen, Körner, Pellets...)**
 - ☞ **Ertrag**
 - ☞ **Auslastung (Schüttdichte)**
 - ☞ **Energiedichte (Schüttdichte, Wassergehalt...)**
 - ☞ **Anzahl Fahrzeugbewegungen**
 - ☞ **Mittlerer Transportentfernung**

- **Lagerung**
 - ☞ **Selbstentzündung und Brandrisiko**
 - ☞ **Gesundheitliche Risiken**

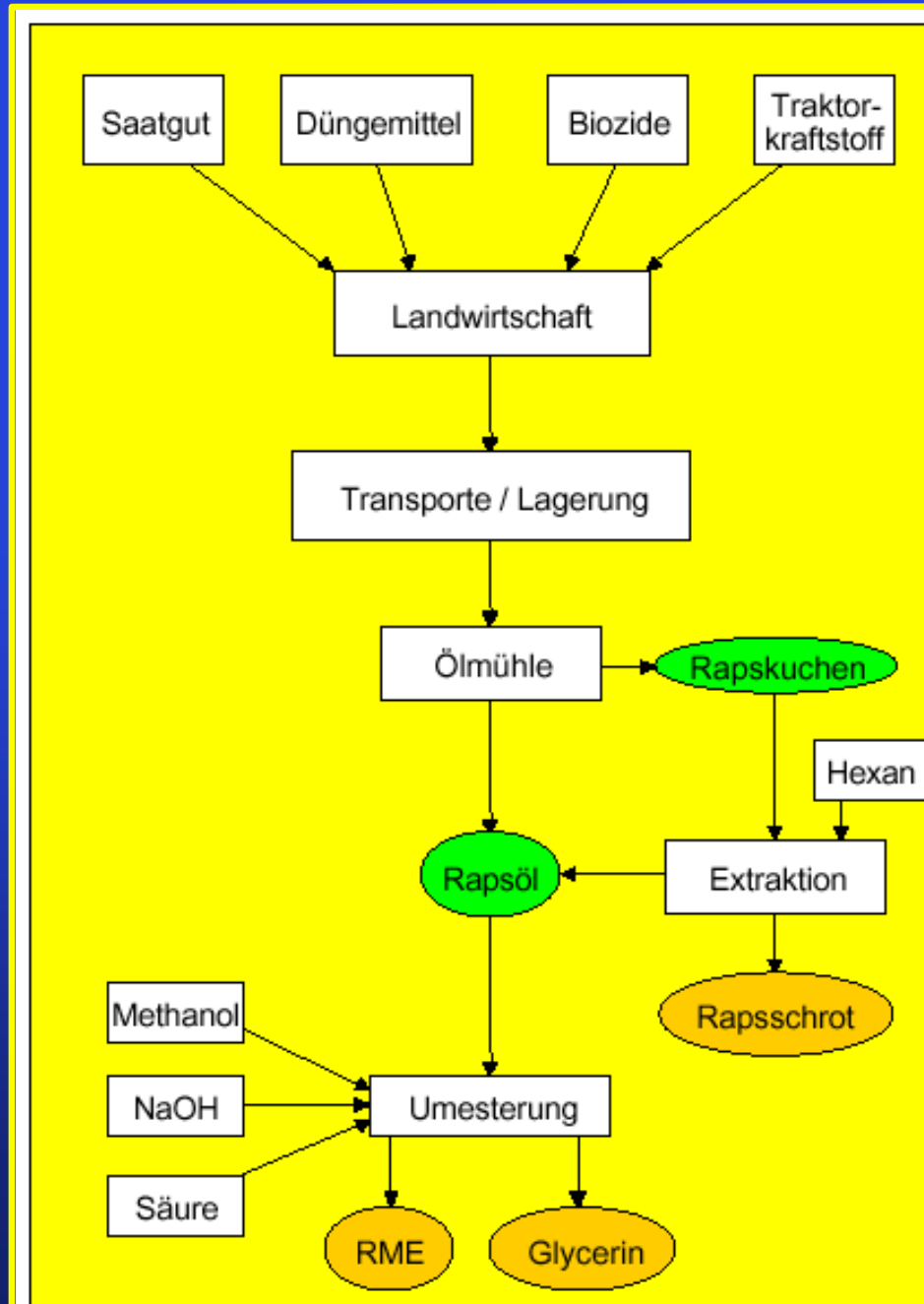
- **Aufbereitung und Handhabung**
 - ☞ **Staubemissionen (Stäube, Pilzsporen...)**
 - ☞ **Beigabe von Additiven: positive oder negative Auswirkungen**

Biomasse: Weitere Umweltaspekte **- Gewinnung und Verwertung biogener Kraftstoffe -**

- **Umweltaspekte der Gewinnung bzw. Aufbereitung**
- **Gewässergefährdung durch den Kraftstoff**
- **Biologische Abbaubarkeit**
- **Explosionsrisiken**
- **Schadstoffemission bei der Kraftstoffverwertung**
- **Geruchsbelästigung**

Biomasse: Weitere Umweltaspekte - Erzeugung und Verwertung von Biogas -

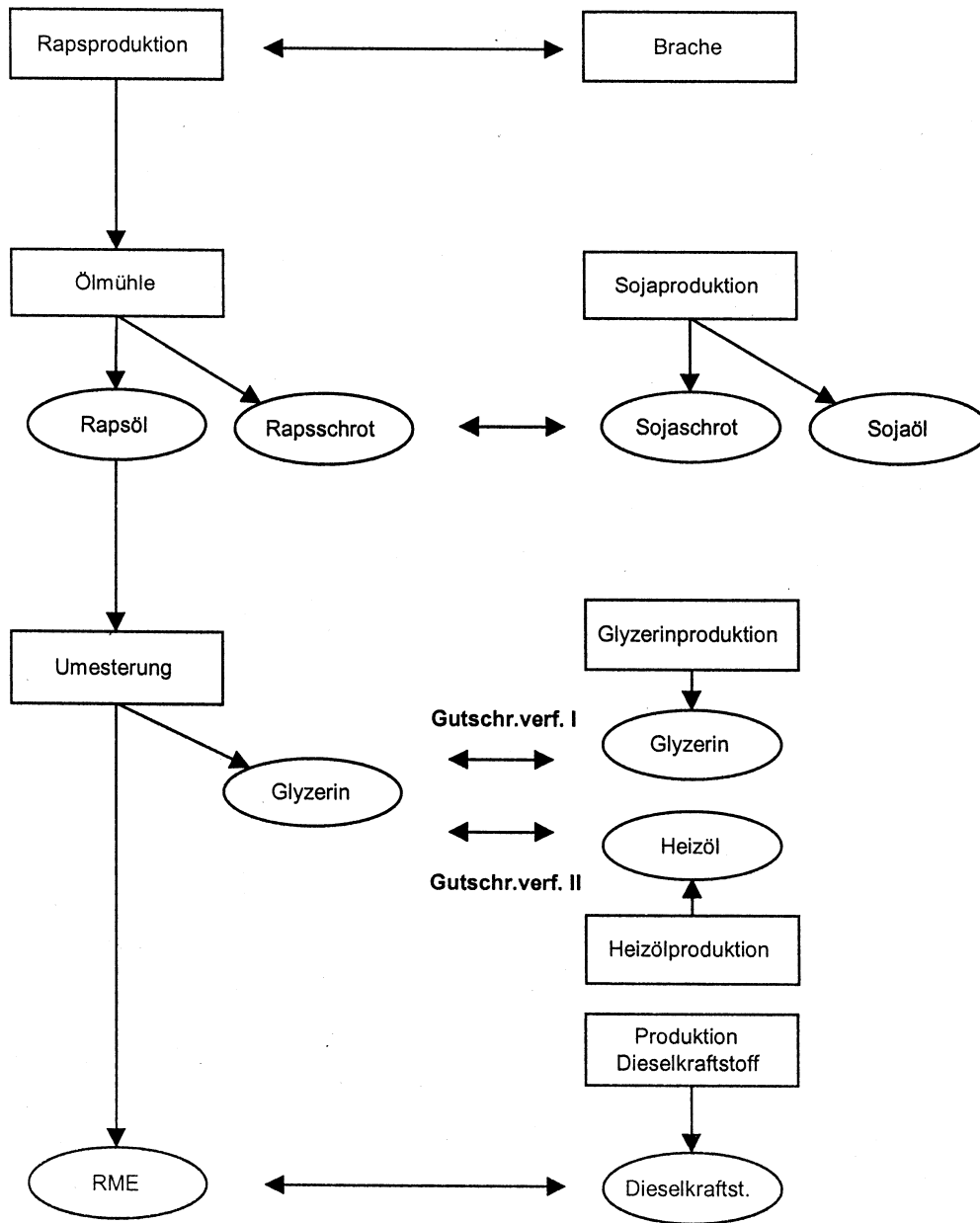
- **Geruchsemissionen**
- **Verätzungen bei Pflanzen**
- **Hygienisierung**
- **Nitratauswaschung**
- **Klimarelevante Emissionen**
- **Emissionen aus der Biogasverbrennung**



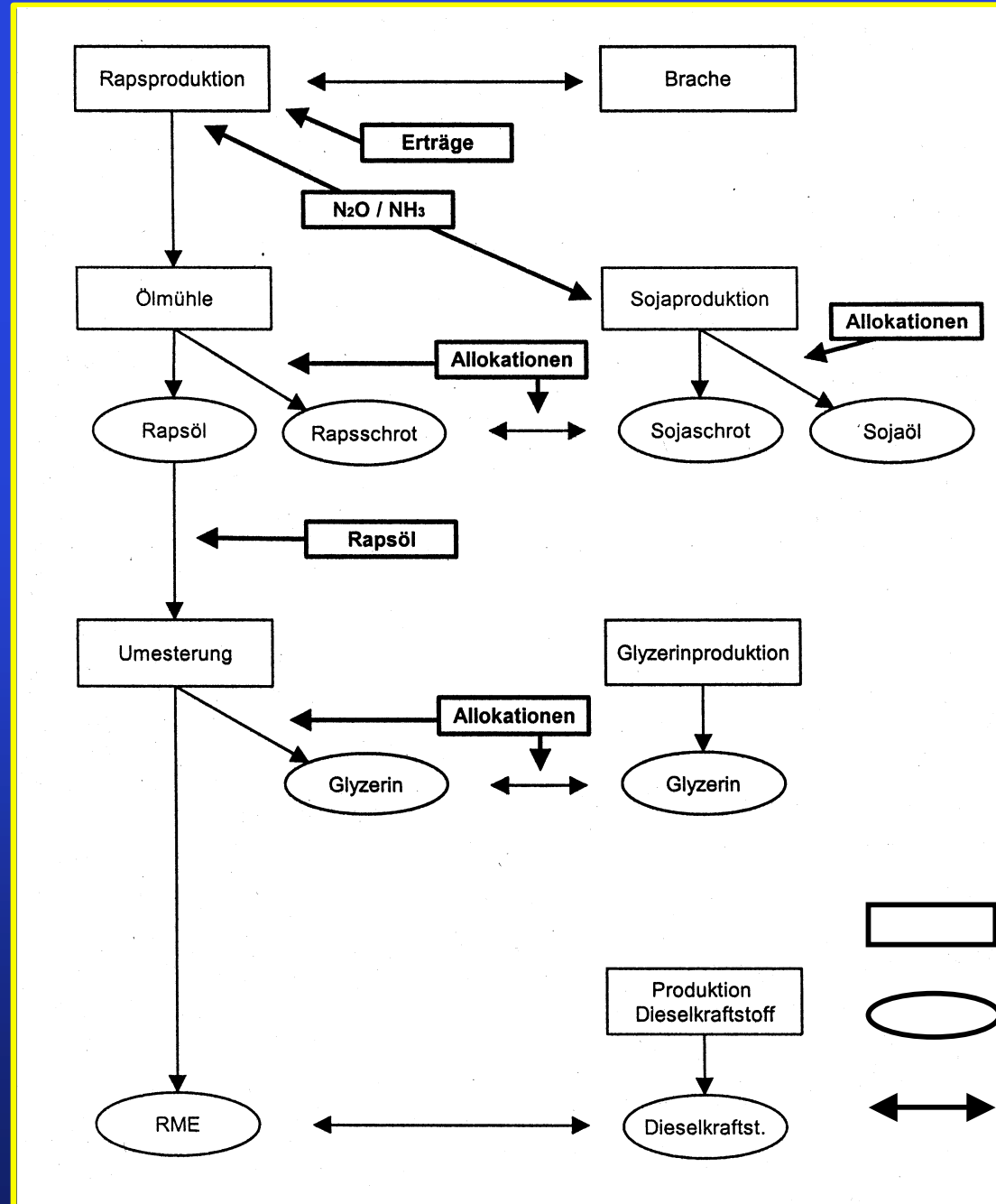
Schematische Darstellung der RME-Produktion

einschließlich der
Kuppelprodukte Glycerin und
Rapsschrot

**Lebensweg-
 vergleiche
 der RME-
 Bereitstellung
 (stark vereinfacht)**



Prozesse
 Stoffe
 ↔ Substitutionen



Sensitivitäts- analysen

ökologischer Abschätzungen der RME- Bereitstellung

Prozesse

Stoffe

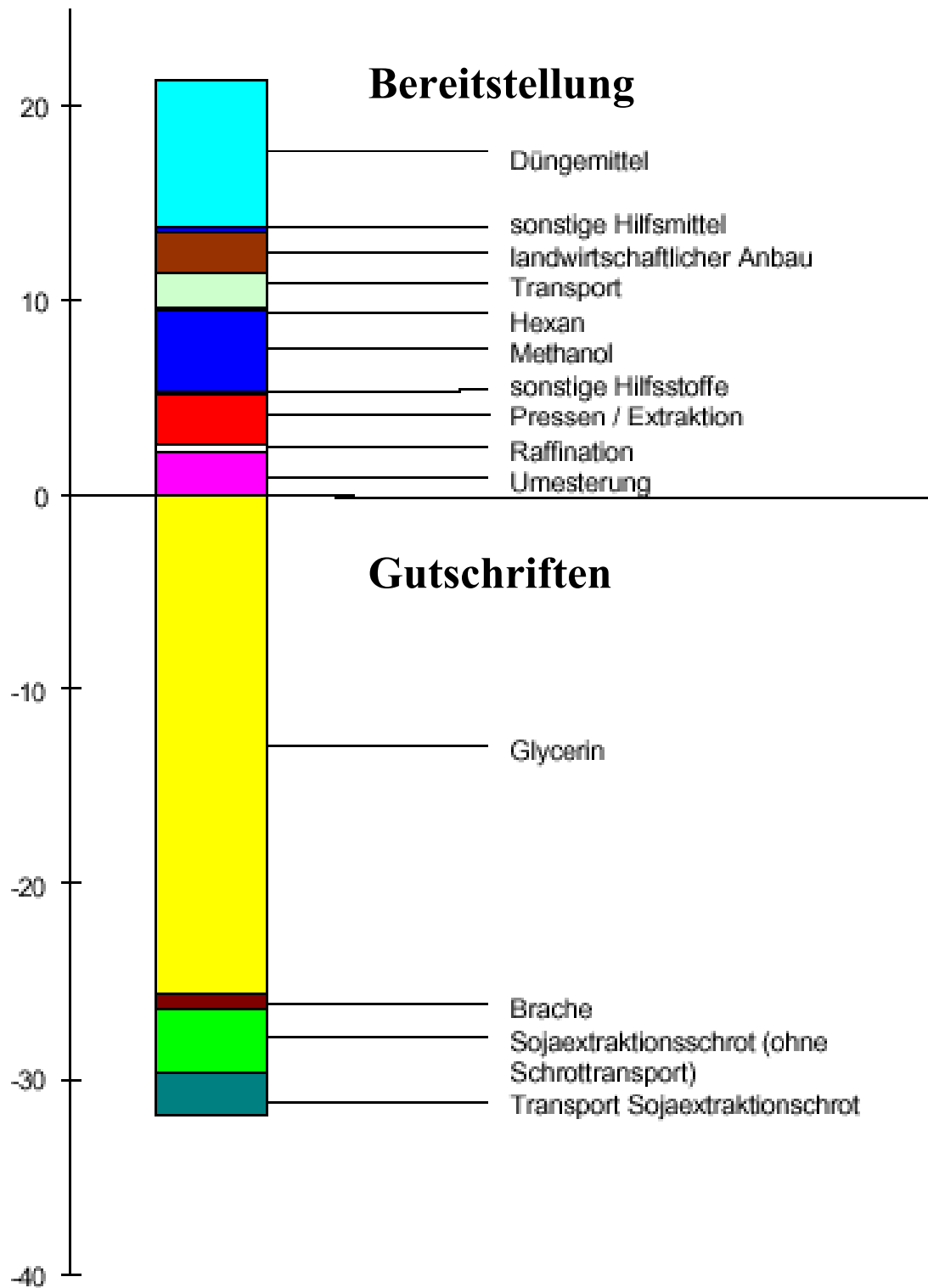
Substitutionen

Allokationsanteile für ausgewählte Kuppelprodukte der RME-Produktion bezüglich verschiedener Allokationsgrößen

	Sojaöl / Sojaschrot	Rapsöl / Rapsschrot	RME / Glycerin
Masse	18,8 : 81,2	39,7 : 60,3	89,4 : 10,6
Heizwert	34,4 : 65,6	59,6 : 40,4	96,0 : 4,0
Preis	35,0 : 65,0	70,0 : 30,0	79,2 : 20,8

Quelle: /Oil World 1996/, /Kaltschmitt & Reinhardt 1997/, eigene Berechnungen

MJ / kg RME

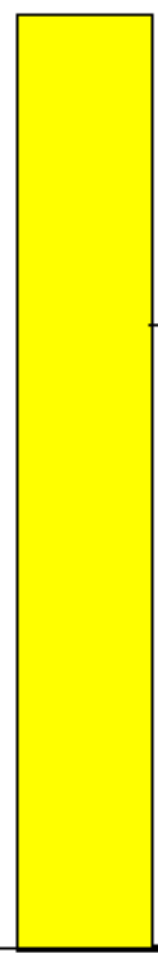


Energieaufwand ($KEA_{\text{erschöpflich}}$) für die RME-Bereitstellung nach Lebenswegabschnitten (mit Gutschriften)

MJ/kg RME



Bereitstellung



eingestrahle
Sonnenenergie

restliche
Bereitstellung
(25 MJ/kg)

Gutschriften
gesamt
(32 MJ/kg)

Gutschriften

**KEA_{gesamt} der
RME-Bereitstellung und
Gutschriften bei der
Systemgrenze
„eingestrahle Sonnenenergie
auf die gesamte
landwirtschaftliche Fläche“**

	(MJ / kg RME)
KEA gesamt (Gutschrift, Sonnenenergie)	97.210
KEA gesamt (Allokation-max, Sonnenenergie)	74.064
KEA gesamt (Allokation-min, Sonnenenergie)	46.290
KEA gesamt (Gutschrift, Heizwert)	26
KEA gesamt (Allokation-max, Heizwert)	44
KEA gesamt (Allokation-min, Heizwert)	28
KEA fossil (Gutschrift, Heizwert)	- 11
KEA fossil (Allokation-max, Heizwert)	16
KEA fossil (Allokation-min, Heizwert)	10
KEA regener. (Gutschrift, Sonnenenergie)	97.221
KEA regener. (Allokation-max, Sonnenenergie)	74.073
KEA regener. (Allokation-min, Sonnenenergie)	46.300
KEA regener. (Gutschrift, Heizwert/Pflanze)	49
KEA regener. (Gutschrift, Heizwert/Feldgrenze)	37
KEA regener. (Allokation-max, Heizwert/FG)	28
KEA regener. (Allokation-min, Heizwert/FG)	18

**KEA der
 RME-Produktion**
**- Ergebnisse
 von drei Kenngrößen
 bei unterschiedlichen
 Berechnungsverfahren**



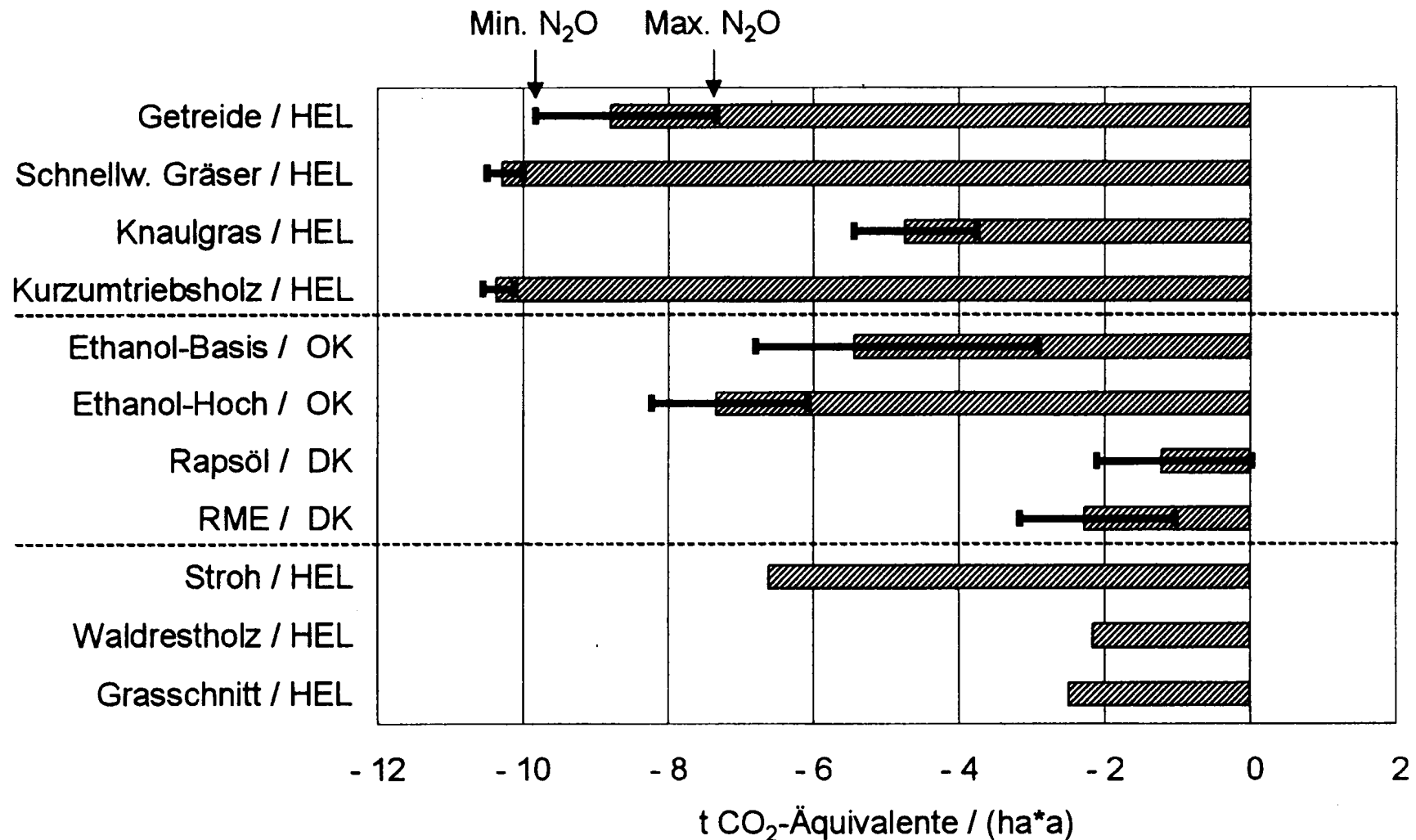
Ökobilanz Bioenergieträger

Basisdaten, Ergebnisse, Bewertungen

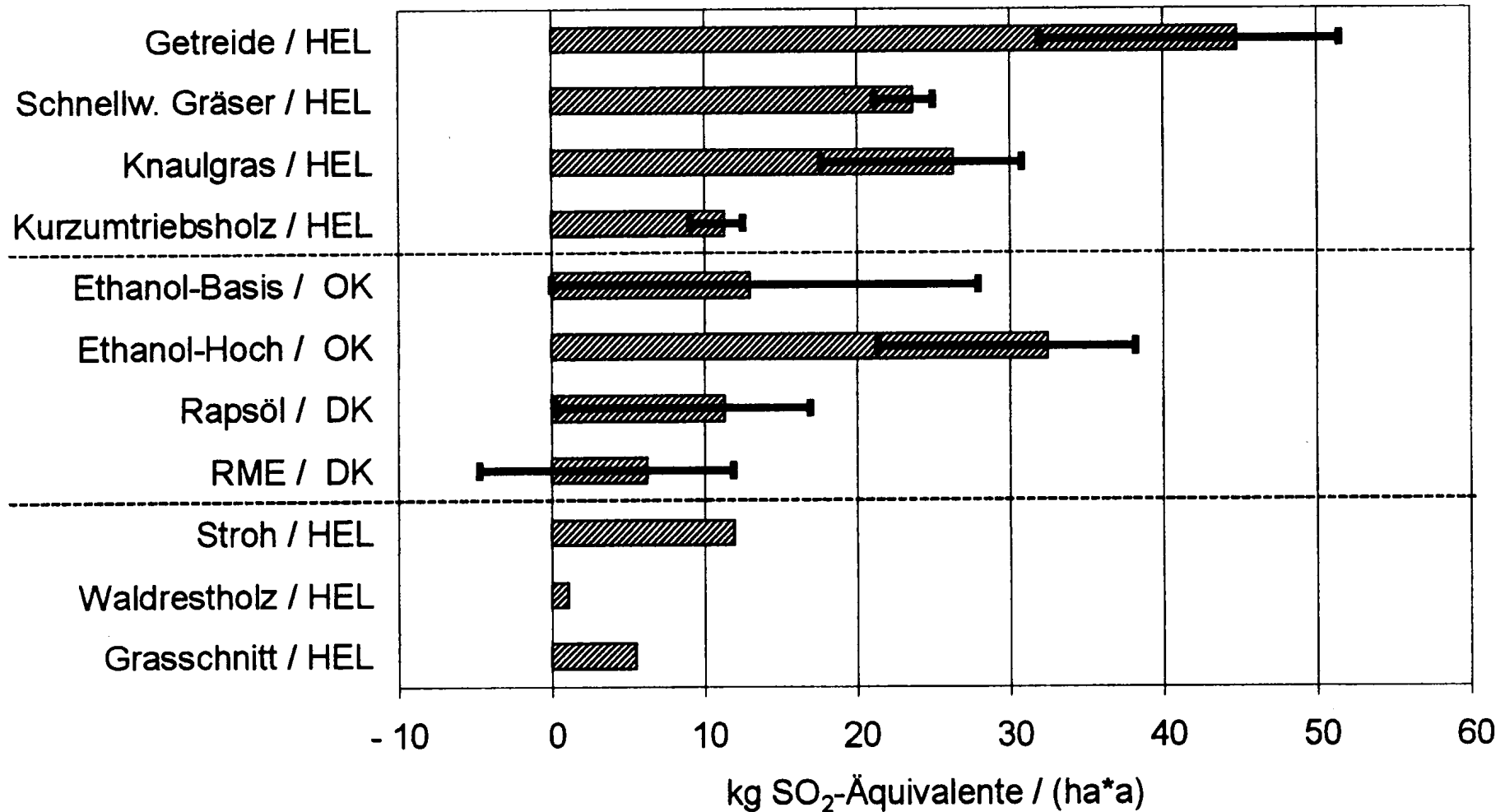
Von Dr. Guido A. Reinhardt und Guido Zemanek, ifeu-Institut Heidelberg

2000, XII, 163 Seiten, 15,8 x 23,5 cm,
kartoniert,
DM 48,-/sfr 43,-/ab 1.1.2002: EUR (D) 24,80,
ISBN 3 503 05814 1,
Initiativen zum Umweltschutz, Band 17

Salden der CO₂-Äquivalente für die Basis-Lebenswegvergleiche



Salden der SO₂-Äquivalente für die Basis-Lebenswegvergleiche



Einwohnerdurchschnittswerte (EDW) bezogen auf Einwohner und Jahr sowie zugehörige Basisdaten (Bezugsjahr: 1996)

Wirkungsindikator / Sachbilanzparameter	Betrag	Einheit	Datenquelle	EDW	Einheit
Erschöpfliche PE ^a	14.486	PJ	BMWi 1998	177	GJ/(Ew.*a)
Mineralöl	5.800	PJ	BMWi 1998		
Steinkohle	2.078	PJ	BMWi 1998		
Braunkohle	1.685	PJ	BMWi 1998		
Erdgas, Erdölgas	3.159	PJ	BMWi 1998		
Kernenergie	1.764	PJ	BMWi 1998		
CO₂-Äquivalente	1.080	Mt	Eigene Berechnung ^b	13.167	kg/(Ew.*a)
Kohlendioxid (CO ₂)	910	Mt	UBA 1998		
Methan (CH ₄)	4.724	kt	UBA 1998		
Distickstoffoxid (N ₂ O)	228	kt	UBA 1998		
Distickstoffoxid (N₂O)	228	kt	UBA 1998	2,8	kg/(Ew.*a)
SO₂-Äquivalente	4.376	kt	Eigene Berechnung ^c	53	kg/(Ew.*a)
Schwefeldioxid (SO ₂)	1.851	kt	UBA 1998		
Chlorwasserstoff (HCl)	? ^d	—	—		
Stickoxide (NO _x)	1.859	kt	UBA 1998		
Ammoniak (NH ₃)	651	kt	UBA 1998		
Gesamt-Stickstoff	1.101	kt	Eigene Berechnung ^e	13	kg/(Ew.*a)
Dieselpartikel	13 ^f	kt	Eigene Berechnung	0,15	kg/(Ew.*a)

a: Summe erschöpflicher Primärenergie

b: auf Basis von /UBA 1998/ und /IPCC 1996/

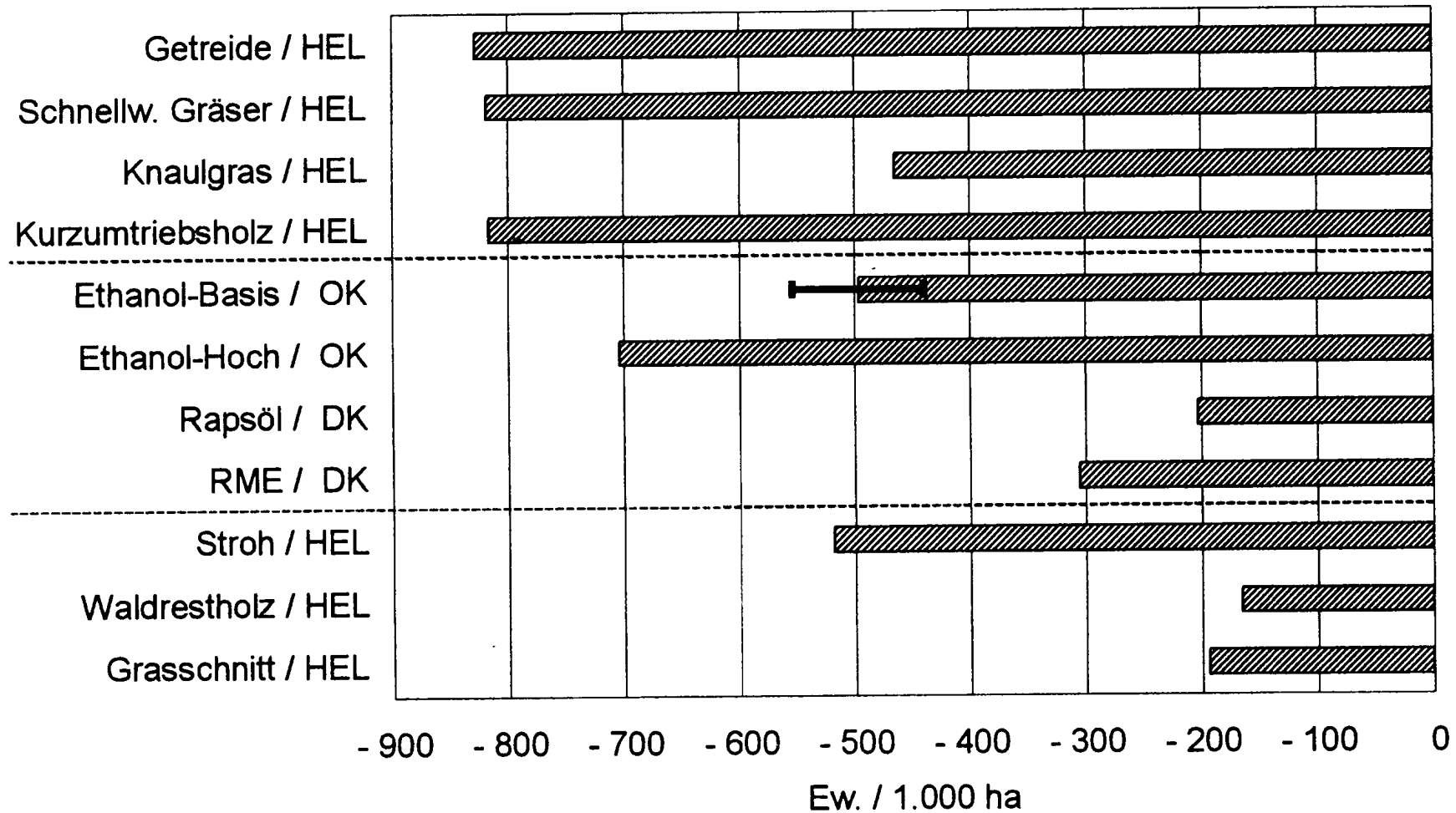
c: auf Basis von /UBA 1998/ und /CML & TNO & B&G 1992/ zitiert in /UBA 1995/

d: Für Chlorwasserstoff sind keine belastbaren Werte zu erhalten.

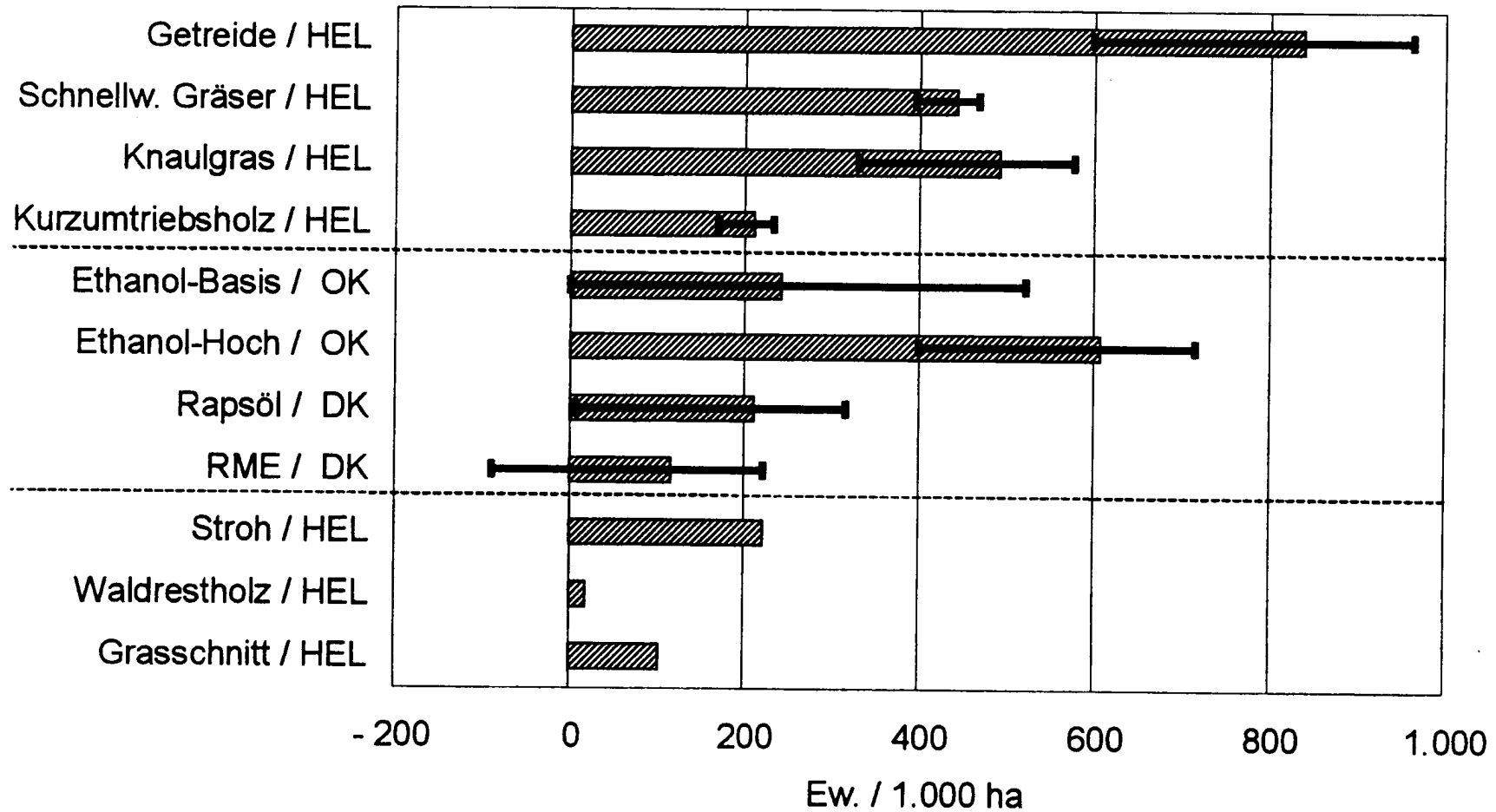
e: auf Basis von /UBA 1998/

f: Es sind nur innerörtliche Emissionen berücksichtigt.

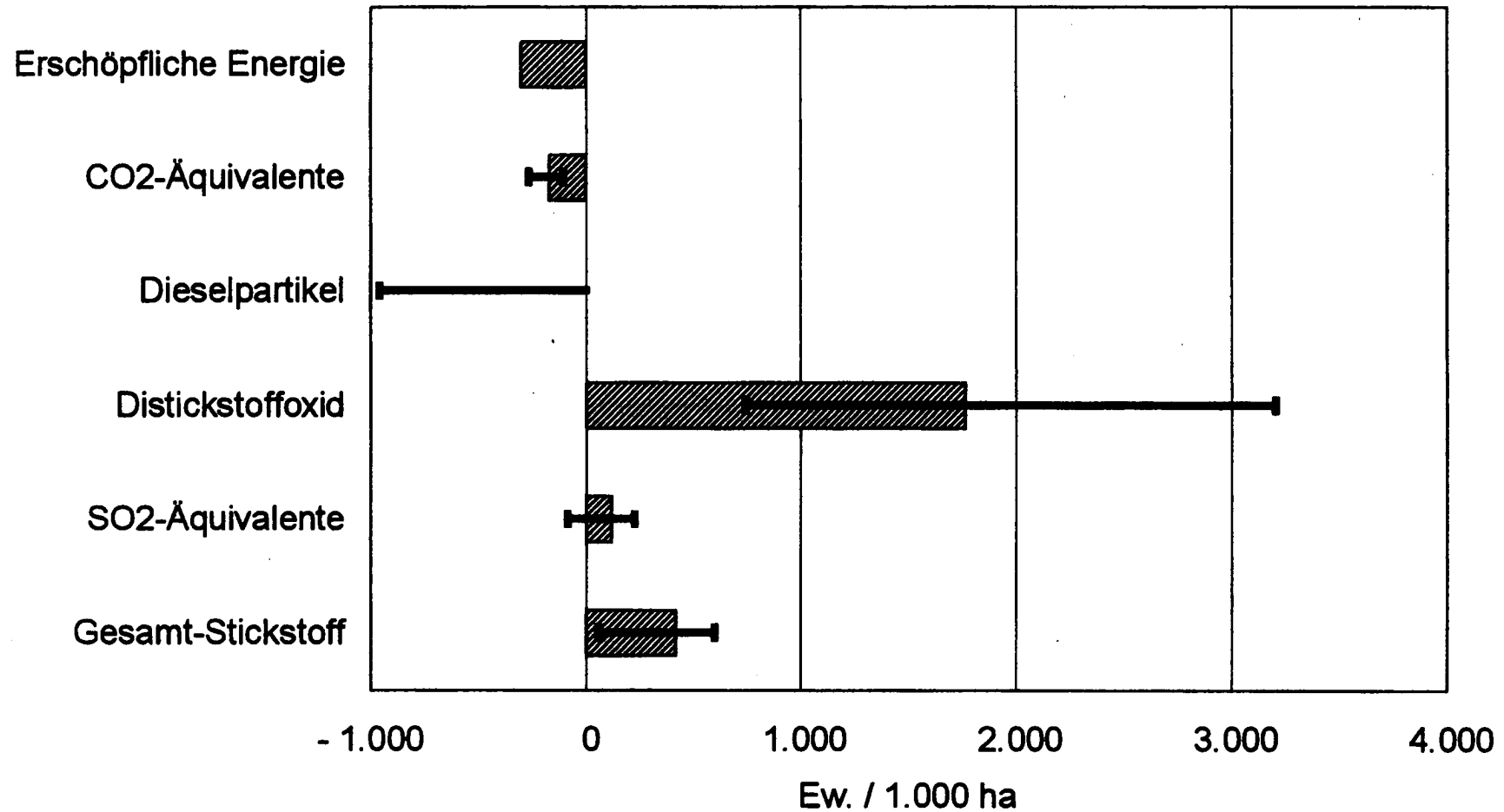
Salden des Verbrauchs erschöpflicher Energie für die Basis-Lebenswegvergleiche



Salden der SO₂-Äquivalente für die Basis-Lebenswegvergleiche



Salden ausgewählter Bilanzparameter für den Basis-Lebenswegvergleich RME-Dieselmotorkraftstoff



Ökoeffizienz-Analyse

Heizsysteme zur Versorgung eines Einfamilienhauses

Ludwigshafen, Oktober 2001

Bernd Vogel, WINGAS GmbH
Silke Schmidt, BASF AG

Geprüfte Ökoeffizienz-Analyse;
geprüft durch:



Ökoeffizienzstudie Heizsysteme von WINGAS: Produktsysteme: Strom- und Wärmeversorgung EFH

Produkt
auswählen

Bedarfsbezogenen
Nutzen bestimmen

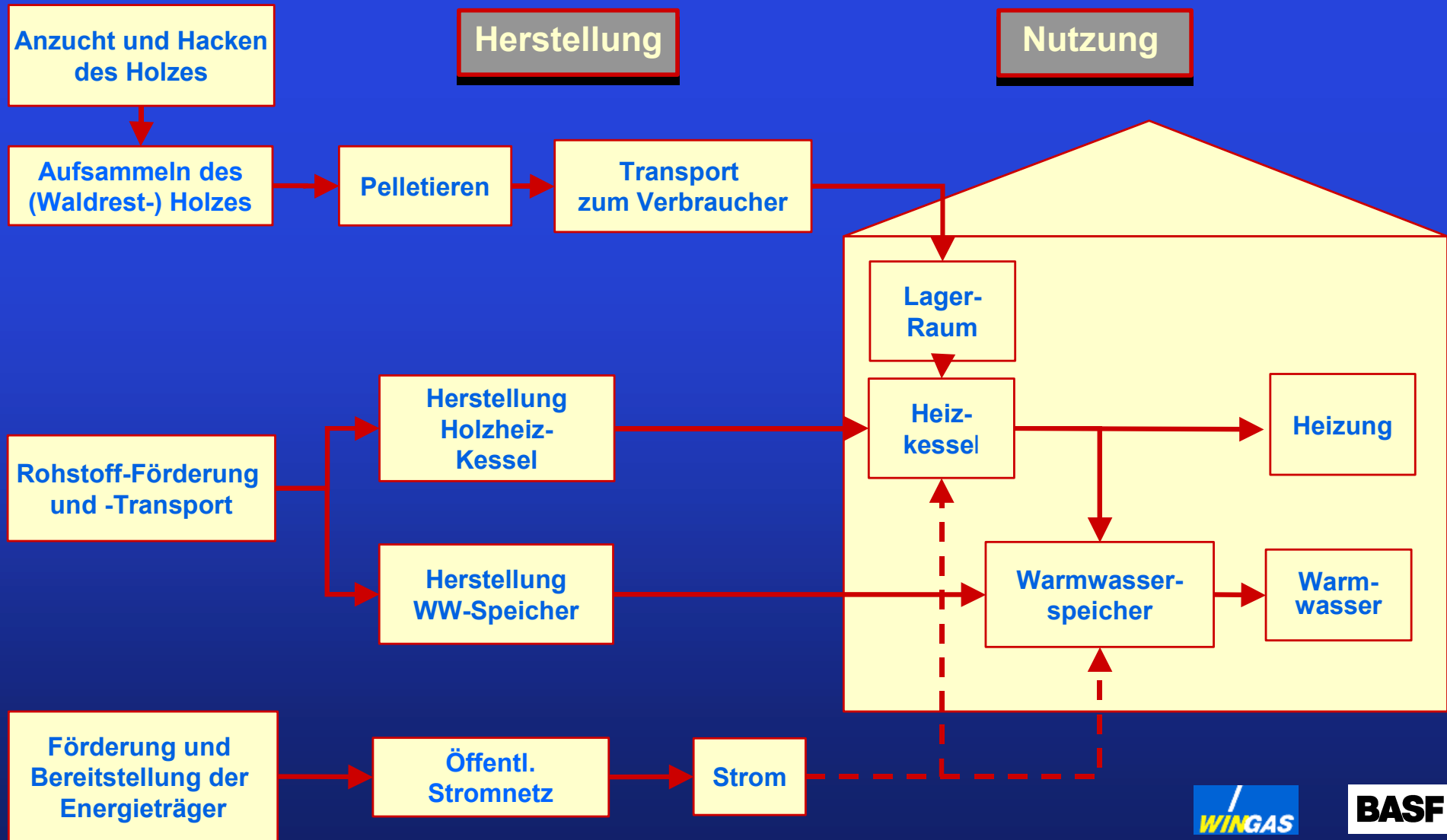
Vergleichbare Produkte
definieren

- Brennwertkessel Erdgas

Heizung und Brauchwarmwasserversorgung eines freistehenden Einfamilienhauses über 1 Jahr

- Niedertemperatur-Kessel - Erdgas
- Niedertemperatur-Kessel - Heizöl
- Speicherheizung - Strom
- Brennwertgerät-Erdgas und Solarenergie
- Biomasseverbrennung (Holzheizkessel)
- Wärmepumpe (Strom)

Ökoeffizienzstudie Heizsysteme von WINGAS: Systemgrenzen Biomasseverbrennung (Holz)

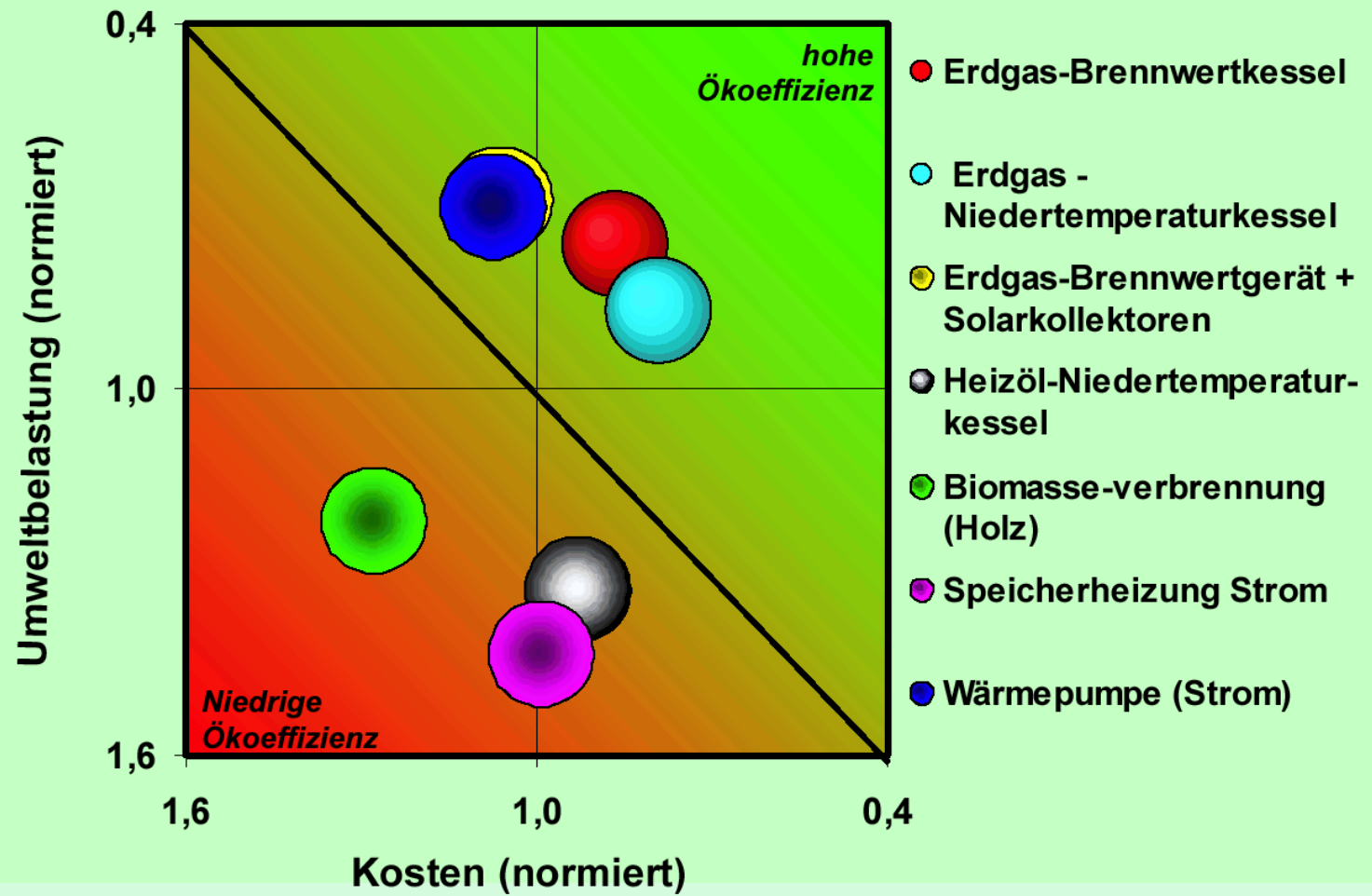


Ökoeffizienzstudie Heizsysteme von WINGAS: Profil Heiz- / Brauchwassererwärmung: Basisfall

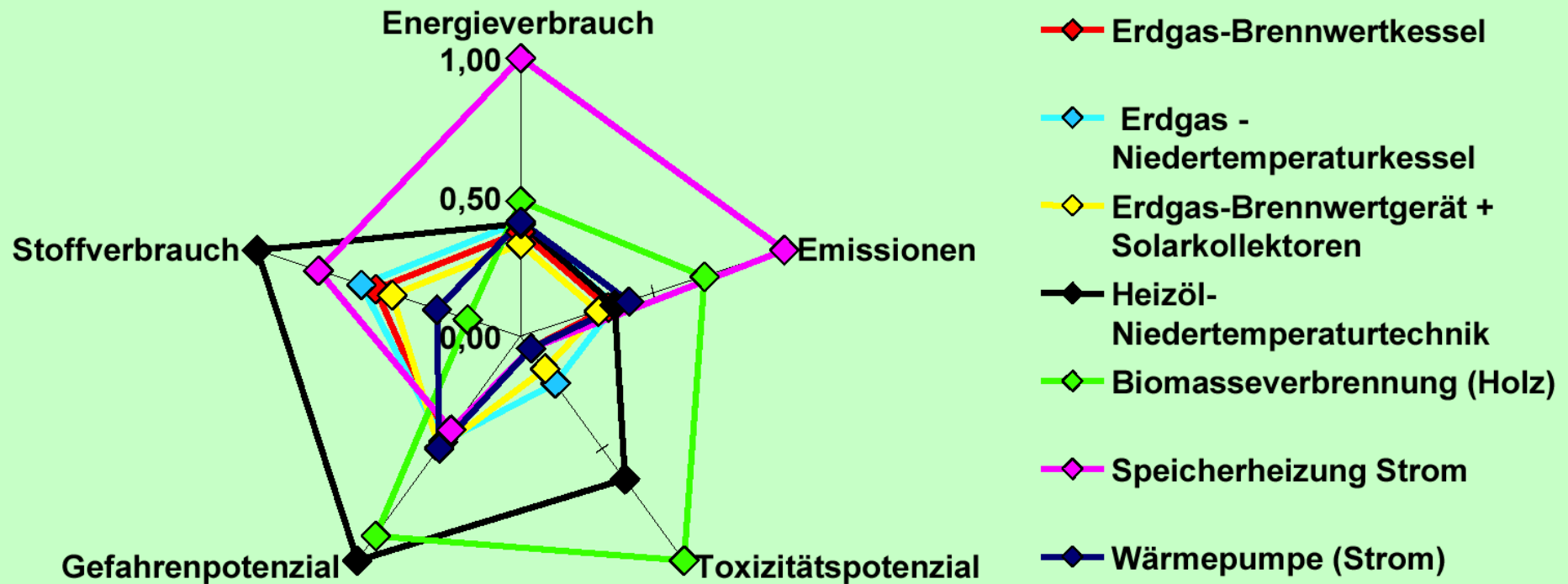
Base case

**Kunden-
 bezogener
 Nutzen:**

Heizung und
 Brauch-
 warmwasser-
 versorgung
 eines
 freistehenden
 Einfamilien-
 hauses über
 1 Jahr

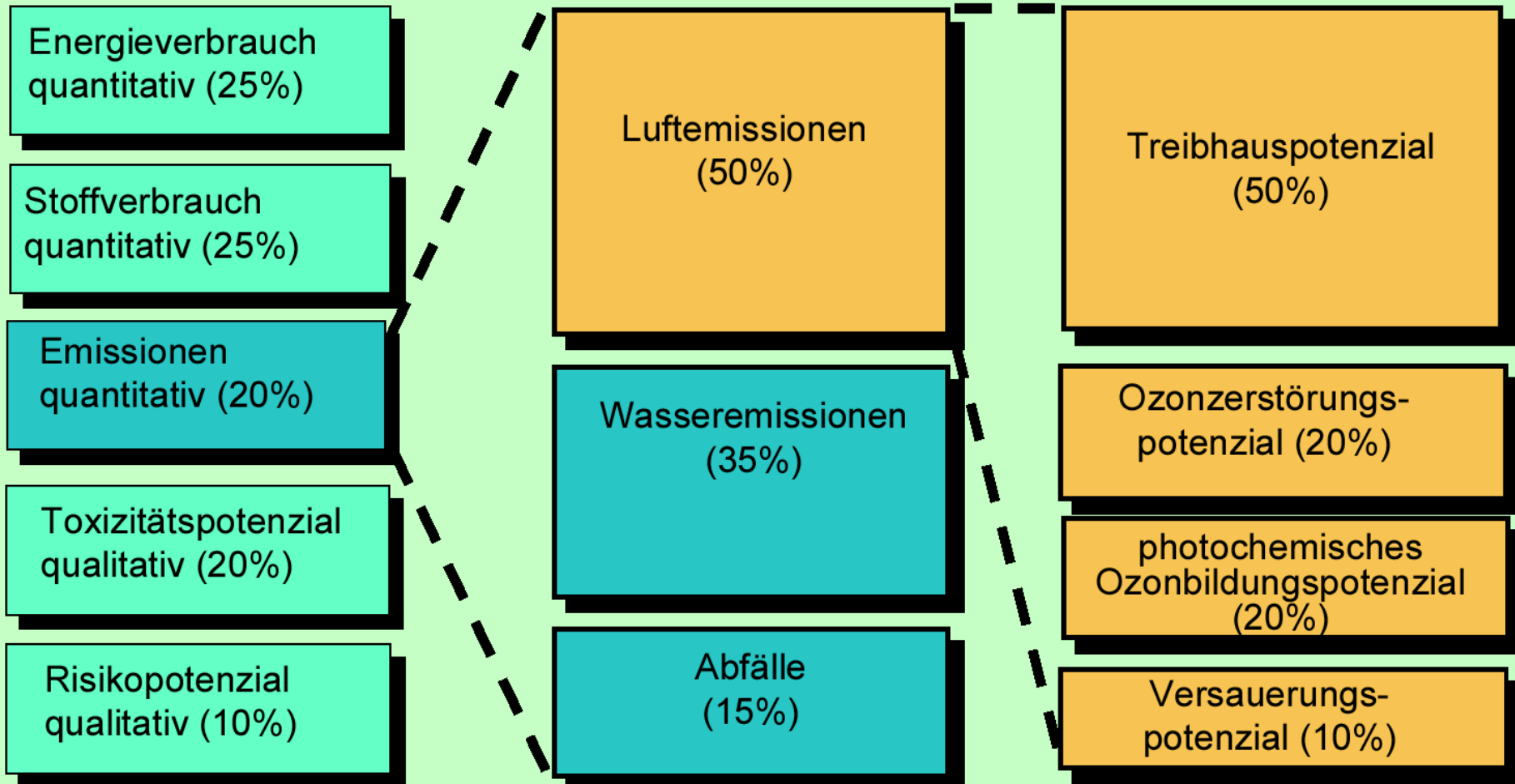


Ökoeffizienzstudie Heizsysteme von WINGAS: Ökologischer Fingerabdruck



Schlechteste Alternative = 1; alle anderen relativ dazu bewertet

Ökoeffizienzstudie Heizsysteme von WINGAS: Ökol. Gewichtung: Gesellschaftl. Bewertungsfaktoren



Gewichtungsfaktoren für einzelne Wirkungskategorien im Eco-Indikator 95

Wirkung	Gewichtungs- faktor	Einheit
Treibhauseffekt	2,5	kg CO ₂ -Äquivalente
Abbau der Ozonschicht	100	kg ODP-Äquivalente
Versauerung	10	kg SO ₂ -Äquivalente
Eutrophierung	5	kg PO ₄ -Äquivalente
Sommersmog	2,5	C ₂ H ₄ -Äquivalente
Wintersmog	5	C ₂ H ₄ -Äquivalente
Pestizide	25	kg Wirkstoff
Schwermetalle	5	Pb-Äquivalente
Karzinogene Substanzen	10	TCDD-Äquivalente

GEMIS-Berechnung für Umweltwirkungen der Wärmebereitstellung - Luftschadstoffe -

g/kWh	SO ₂	NO _x	Staub	CO	NMVOG
Öl-Hzg atmosphärisch	0,23	0,30	0,02	0,25	0,10
Gas-Hzg atmosphärisch	0,02	0,22	0,01	0,23	0,02
Gas-Hzg Brennwert	0,02	0,16	0,01	0,17	0,02
El-Speicher-Hzg	0,71	0,59	0,04	0,26	0,04
Holzackschnitzel-Heizung	0,27	0,67	0,51	1,58	0,91
Holzackschnitzel-Heizwerk	0,24	0,34	0,31	0,49	0,14

GEMIS-Berechnung für Umweltwirkungen der Wärmebereitstellung - Treibhausgasemissionen -

g/kWh	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO ₂ -Äqu.*
Öl-Hzg atmosphärisch	352	0,13	0,01	356
Gas-Hzg atmosphärisch	251	1,29	0	280
Gas-Hzg Brennwert	221	1,11	0	246
El-Speicher-Hzg	927	4,7	0,05	1.041
Holzhackschnitzel-Heizung	40	0,52	0,05	65
Holzhackschnitzel-Heizwerk	28	0,12	0,03	39

GEMIS-Berechnung für Umweltwirkungen der Wärmebereitstellung - Ressourcenbedarf -

	Primär- energie	Erze	Mineralien	Wasser	Fläche
	kWh/kWh	g/kWh			cm ² /kWh
Öl-Hzg atmosphärisch	1,31	4,3	1,8	97	0,06
Gas-Hzg atmosphärisch	1,29	3,9	5,2	88	0,04
Gas-Hzg Brennwert	1,13	3,7	4,8	125	0,06
El-Speicher-Hzg	2,78	5,9	25,1	2.999	0,06
Holzhackschnitzel-Heizung	1,43	3,3	1,6	156	0,12
Holzhackschnitzel-Heizwerk	1,30	0,8	0,6	84	0,08

Fazits

- **Die Zielstellung bestimmt oft das Ergebnis:**
 - ☞ **Klare Zieldefinition wichtig**
 - ☞ **Offenlegen aller getroffenen Annahmen ist essenziell**
 - ☞ **Offenlegen aller verwendeten Basisdaten**
- **Ergebnisse der Lebenszyklusbetrachtungen**
 - ☞ **Abhängigkeit von vorgegebenen Schutzzielen!**
 - ☞ **Vorteilhaftigkeit einzelner Varianten hängt oft von den konkret betrachteten Systemen ab**
 - ☞ **Deutliche Unterschiede der Biomasse-Einordnung zwischen Strom- und Wärmebereitstellung**
- **Ökobilanzen allein reichen nicht aus für Entscheidungen!**
 - ☞ **Ökonomische Betrachtungen**
 - ☞ **Technikanalyse**
 - ☞ **Sozioökonomische Aspekte**