



# Netzwerk Lebenszyklusdaten

Arbeitskreis WERKSTOFF IM BAUWESEN



## Datenprojekt Grunddatensätze Gips und Gipsprodukte im Netzwerk Lebenszyklusdaten

### Projektbericht

im Rahmen des Forschungsvorhabens FKZ 01 RN 0401 im Auftrag  
des Bundesministeriums für Bildung und Forschung

PE INTERNATIONAL GmbH

Leinfelden-Echterdingen Karlsruhe – August 2007

Hrsg.: Forschungszentrum Karlsruhe  
Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse –  
Zentralabteilung Technikbedingte Stoffströme



Forschungszentrum Karlsruhe  
in der Helmholtz-Gemeinschaft

## Vorwort

Der vorliegende Projektbericht wird herausgegeben vom Netzwerk Lebenszyklusdaten ([www.netzwerk-lebenszyklusdaten.de](http://www.netzwerk-lebenszyklusdaten.de)).

Das Netzwerk Lebenszyklusdaten ist die gemeinsame Informations- und Koordinationsplattform aller in die Bereitstellung und Nutzung von Lebenszyklusdaten in Deutschland involvierten Gruppen – von Wissenschaft und Wirtschaft über Politik und Behörden hin zu Verbraucherberatung und allgemeiner interessierter Öffentlichkeit. Ziel des Netzwerks Lebenszyklusdaten ist es, das umfangreiche Knowhow auf dem Gebiet der Lebenszyklusdaten innerhalb Deutschlands zusammenzuführen und als Basis zukünftiger wissenschaftlicher Weiterentwicklung und praktischer Arbeiten für Nutzer in allen Anwendungsgebieten von Lebenszyklusanalysen bereitzustellen.

Das Netzwerk Lebenszyklusdaten wird getragen vom Forschungszentrum Karlsruhe. Die vorliegende Studie wurde im Rahmen der Projektförderung (2004 – 2008) des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) „Förderung der Wissenskooperation zum Aufbau und Umsetzung des deutschen Netzwerks Lebenszyklusdaten“ erstellt. Weitere im Rahmen dieser Projektförderung erstellte Studien sind erhältlich unter <http://www.netzwerk-lebenszyklusdaten.de/cms/content/Projektberichte>.

### Kontakt Netzwerk Lebenszyklusdaten:

E-Mail: [info@netzwerk-lebenszyklusdaten.de](mailto:info@netzwerk-lebenszyklusdaten.de)

Anschrift: Forschungszentrum Karlsruhe GmbH  
Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse,  
Zentralabteilung Technikbedingte Stoffströme (ITAS-ZTS)  
Postfach 3640  
76021 Karlsruhe  
[www.netzwerk-lebenszyklusdaten.de](http://www.netzwerk-lebenszyklusdaten.de)



Das Netzwerk Lebenszyklusdaten wird gefördert durch das  
Bundesministerium für Bildung und Forschung



# **Datenprojekt Grunddatensätze Gips und Gipsprodukte im Netzwerk Lebenszyklusdaten**

## **Autoren:**

Johannes Kreißig  
PE INTERNATIONAL GmbH

Alexander Stoffregen  
PE INTERNATIONAL GmbH

## **Kontakt:**

PE INTERNATIONAL GmbH  
Hauptstr. 111-113  
70771 Leinfelden-Echterdingen  
Germany  
Tel +49 711 3418170

Email: [j.kreissig\(at\)pe-international.com](mailto:j.kreissig(at)pe-international.com)





## Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis .....	2
Abbildungsverzeichnis .....	3
Tabellenverzeichnis .....	4
Nomenklatur .....	5
1 Einleitung.....	6
2 Systembeschreibung und Untersuchungsrahmen.....	6
2.1 Produktdefinition und Funktionelle Einheit .....	6
2.1.1 Produktdefinition.....	6
2.1.2 Herstellungswege .....	7
2.1.3 Verwendung der Produkte .....	8
2.1.4 Recycling und Entsorgungsmöglichkeiten.....	9
2.1.5 Situation der Gipsbranche .....	9
2.2 Systemgrenzen.....	10
2.3 Abschneidekriterien .....	11
2.4 Datenqualität .....	11
2.5 Allokationen.....	12
2.6 Prozessdaten.....	12
3 Ergebnisse der Sach- und Wirkungsbilanz .....	16
3.1 Sachbilanz.....	16
3.2 Wirkungsbilanz und Plausibilitätsbetrachtungen .....	19
4 Anwendungsmöglichkeiten der Ergebnisse .....	23
5 Fortschreibung und Aktualisierung der Daten .....	23
6 Literaturverzeichnis.....	25
Anhang A Sachbilanzdaten .....	27
Anhang B Beschreibung der Auswertegrößen.....	27
Anhang B 1 Primärenergieverbrauch .....	27
Anhang B 2 Abfallgrößen .....	27
Anhang B 3 Treibhauseffekt (GWP) .....	27
Anhang B 4 Versauerungspotenzial (AP) .....	27
Anhang B 5 Eutrophierungspotential (EP).....	27
Anhang B 6 Photooxidantienbildung (POCP) .....	27
Anhang B 7 Ozonabbaupotenzial (ODP).....	27



## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1:	Verwendungsmöglichkeiten der verschiedenen Bindemittel aus Gips [ARENDE 2000].....	9
Abbildung 2.2:	Produktsystem der Gipsherstellung .....	11
Abbildung 3.1:	Ausgewählte Sachbilanzergebnisse für $\beta$ -Halbhydrat .....	17
Abbildung 3.2:	Ausgewählte Sachbilanzergebnisse für $\alpha$ -Halbhydrat .....	18
Abbildung 3.3:	Ausgewählte Sachbilanzergebnisse für Anhydrit-Mix.....	18
Abbildung 3.4:	Wirkungsbilanzergebnisse für $\beta$ -Halbhydrat.....	21
Abbildung 3.5:	Wirkungsbilanzergebnisse für $\alpha$ -Halbhydrat .....	22
Abbildung 3.6:	Wirkungsbilanzergebnisse für Anhydrit-Mix .....	23
Abbildung A 1:	Anthropogener Treibhauseffekt (KREISSIG 1999) .....	27
Abbildung A 2:	Versauerung (KREISSIG 1999).....	27
Abbildung A 3:	Quellen der Eutrophierung (KREISSIG 1999).....	27
Abbildung A 4:	Bodennahe Ozonbildung (Sommermog) (KREISSIG 1999).....	27
Abbildung A 5:	Ozonabbau (KREISSIG 1999).....	27



## Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1:	Betrachtete Bindemittel aus Calciumsulfat.....	7
Tabelle 2.2:	Brennaggregate zur Gipsherstellung [GIPS 2006] .....	8
Tabelle 2.3:	Massenströme für 1t Dihydrat.....	13
Tabelle 2.4:	Emissionsfaktoren für die Dieselerbrennung in Baumaschinen.....	13
Tabelle 2.5:	Massenströme für 1t $\beta$ - und $\alpha$ -Halbhydrat.....	14
Tabelle 2.6:	Massenströme für 1t Anhydrit (Bergwerk, Tagebau und thermisch).....	15
Tabelle 2.7:	Massenströme für 1t technischen Anhydrit aus der Flusssäuresynthese.....	15
Tabelle 3.1:	Ausgewählte Sachbilanzergebnisse für Bindemittel aus Gips.....	16
Tabelle 3.2:	Wirkungsbilanzergebnisse für Bindemittel aus Gips .....	20
Tabelle 3.3:	Wirkungsbilanzergebnisse der Toxizitätspotentiale für Bindemittel aus Gips .....	20



## Nomenklatur

<b>Abkürzung</b>	<b>Erläuterung</b>
AP	Versauerungspotential
CaSO <sub>4</sub>	Calciumsulfat
EP	Eutrophierungspotential
FAETP	Aquatisches Frischwasser Ökotoxizitätspotential
GWP	Treibhauspotential
HTP	Humantoxizitätspotential
MAETP	Aquatisches Salzwasser Ökotoxizitätspotential
NMVOC	Nicht-Methan flüchtige Kohlenwasserstoffe
POCP	Photochemische Oxidantienbildungspotential
REA	Rauchgasentschwefelungsanlage
TETP	Terrestrisches Ökotoxizitätspotential





## 1 Einleitung

Im Rahmen des Projektes "Förderung der Wissenschaftskooperation zum Aufbau und Umsetzung des deutschen Netzwerk Lebenszyklusdaten" (Förderkennzeichen: 01 RN 0401) im Bereich Werkstoffe im Bauwesen erfolgte die Erstellung von Ökobilanzdatensätze für Bindemittel auf Gipsbasis. Grundsatzdatensätze für folgende vier Bindemittel wurden erstellt:

- Calciumsulfatdihydrat
- Calciumsulfat  $\alpha$ -Halbhydrat
- Calciumsulfat  $\beta$ -Halbhydrat
- Anhydrit-Mix,

Die Ökobilanzdatensätze stellen nationale Durchschnittswerte dar. Die Daten basieren im Wesentlichen auf Datenerhebungen des Bundesverbandes der Gips- und Gipsbauplattenindustrie [GIPS 2007].

## 2 Systembeschreibung und Untersuchungsrahmen

### 2.1 Produktdefinition und Funktionelle Einheit

#### 2.1.1 Produktdefinition

Gips ist Calciumsulfat, das in verschiedenen Hydratstufen in Bindung mit Kristallwasser oder auch vollständig ohne Wasser vorliegen kann. Bei natürlichem Gipsstein handelt es sich um Calciumsulfat-Dihydrat ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), bei der in der Natur vorkommenden wasserfreien Form des Calciumsulfates handelt es sich um Anhydrit. Durch Dehydratation des Calciumsulfat-Dihydrat kann der Gips in seine Halbhydratform ( $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$ , Calciumsulfat-Halbhydrat) oder in seine kristallwasserfreie Form, dem Anhydrit, überführt werden. Durch unterschiedliche Brennbedingungen lassen sich zwei verschiedene Calciumsulfat-Halbhydrate herstellen. Sie werden als  $\alpha$ -Halbhydrat und  $\beta$ -Halbhydrat bezeichnet und unterscheiden sich in ihren physikalischen Eigenschaften.

Neben den natürlich vorkommenden Calciumsulfaten Naturgips und Naturanhydrit wird Gips auch aus technischen Prozessen gewonnen. Besondere Bedeutung hat hierbei der Rauchgips (REA-Gips) der bei der Rauchgasentschwefelung in Kohlekraftwerken anfällt. Der aus Rauchgasentschwefelungsanlagen anfallende Gips liegt als Calciumsulfat-Dihydrat vor. Synthetischer Anhydrit bzw. Fluoroanhydrit fällt bei der Flusssäuresynthese aus Flussspat mit konzentrierter Schwefelsäure an. Weiterhin fallenden aus einer Reihe von chemischen Prozessen, wie z.B. der Caprolactam-, Weinsäure-, Zitronensäure- und Oxalsäureherstellung geringe Mengen Gips ohne wirtschaftliche Bedeutung an.

In dieser Studie werden als Produkte ausschließlich Gipse als Bindemittel und Zuschlagstoff betrachtet. Die sich aus den unterschiedlichen Bindemitteln herstellbaren Gipsprodukte, wie Gipskarton- oder Gipsfaserplatten sind nicht Teil dieser Studie. Insgesamt werden vier Bindemittel, die aus Naturgips, Naturanhydrit, REA-Gips oder aus Fluoroanhydrit gewonnen werden, betrachtet und in Tabelle 2.1 dargestellt. Sachbilanz und Wirkungsab-



schätzung beziehen sich jeweils auf eine Tonne dieser vier auf Gips basierenden Bindemittel.

**Tabelle 2.1: Betrachtete Bindemittel aus Calciumsulfat**

Name	Summenformel	Bemerkung
Calciumsulfat-Dihydrat	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	
Anhydrit-Mix	$\text{CaSO}_4$	Jeweils ein Drittel aus Fluoroanhydrit, Naturanhydrit und thermischen Anhydrit (vollständige Calcinierung von Dihydrat)
Calciumsulfat $\alpha$ -Halbhydrat	$\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$	Aus Calcinierung von Dihydrat (Naturgips, REA-Gips und Koppelproduktionen)
Calciumsulfat $\beta$ -Halbhydrat	$\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$	Aus Calcinierung von Dihydrat (Naturgips, REA-Gips und Koppelproduktionen)

### 2.1.2 Herstellungswege

Natürlicher Gipsstein und Naturanhydrit werden sowohl über als auch unter Tage abgebaut. Der Rohstoff wird durch Sprengen und Brechen aus den natürlichen Lagerstätten gelöst und in geeigneten Zerkleinerungsmaschinen, wie Backen-, Walzen- oder Prallbrechern, Prallmühlen oder Hammermühlen, zerkleinert und klassiert. Dem geförderten Naturanhydrit wird zusätzlich noch durch Trocknung die Restfeuchte (es handelt sich hierbei nicht um eingebundenes Kristallwasser) entzogen.

REA-Gips entsteht in großen Mengen als Nebenprodukt in Kohlekraftwerken bei der Rauchgasentschwefelung. Um die Emission von Schwefeldioxid, das bei der Verbrennung des in der Kohle befindlichen Schwefels entsteht, möglichst gering zu halten, wird in Kohlekraftwerken das Rauchgas des Kohlebrands mit einer Suspension (Lösung) aus Kalkstein ( $\text{CaCO}_3$ ) oder Kalkmilch ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) in Rauchgaswäschern fein aus Düsen besprüht. Als chemische Reaktion bindet der Kalkstein das in den Rauchgasen enthaltene Schwefeldioxid unter Entstehung von Calciumsulfit, das wiederum in Verbindung mit dem Sauerstoff der Luft zu Calciumsulfatdihydrat oxidiert. Bei diesem Verfahren entstehen feine Gipskristalle von ca. 0,03 bis 0,07 mm Größe, die als Calciumsulfat-Dihydrat vorliegen. Durch anschließendes Waschen und Filtrieren entsteht ein Gips von hoher Reinheit. Der erzeugte REA-Gips muss getrocknet werden und kann dann in Abhängigkeit von dem weiteren Produktionsverfahren entweder in der anfallenden feinteiligen Form verwendet werden oder muss vor der Weiterverarbeitung brikettiert werden. Die Entwässerung der Gips suspension mit einem Gipsanteil von 10% findet üblicherweise in einer Kombination aus Hydrozyklon und Vakuumbandfilter statt. Im Zyklon wird die Gips suspension auf ca. 40-50% Wassergehalt entwässert und im Vakuumbandfilter auf 10% Restfeuchte weiter entwässert [RENTZ 2002]. REA-Gips ist in gleicher Weise wie Naturgips zur Herstellung der verschiedenen Gipsprodukte geeignet. Die Unterschiede zwischen Naturgips und REA-Gips in der chemischen Zusammensetzung und im Gehalt an Spurenelementen sind gering [GIPS 2006].

Durch Reaktion von Flussspat ( $\text{CaF}_2$ ) mit konzentrierter Schwefelsäure entsteht bei der Flusssäuresynthese in Drehöfen bei  $160^\circ\text{C}$  Flusssäure (Lösung von Fluorwasserstoff in Wasser) und Anhydrit ( $\text{CaSO}_4$ ). Bei der Herstellung von einer Tonne Fluorwasserstoff fallen 3,4 t Fluoroanhydrit als Koppelprodukt an [WIRSCHING 2005].

Beim Brennen von Dihydrat zu Halbdhydrat oder Anhydrit kommen in der deutschen Gipsindustrie unterschiedliche Brennaggregate zum Einsatz (Tabelle 2.2). Zur Herstellung von Stuckgips (Niederbrand-Gips) ist die Verwendung von Drehöfen verbreitet. Bei Temperaturen von  $120^\circ\text{C}$  bis  $180^\circ\text{C}$  werden im Gleichstromverfahren täglich bis zu 600 Tonnen Stuckgips produziert (überwiegend  $\beta$ -Halbdhydrat). Eine weitere Möglichkeit zur Herstellung von Stuckgips bietet der Gipskocher. Hochbrand-Gips wird in Rostbandöfen hergestellt. Das Material wird mit zunehmender Korngröße nach oben auf das sich bewegende Rostband gelegt. Die Gipsschicht oben wird bis auf ca.  $700^\circ\text{C}$  und unten auf ca.  $300^\circ\text{C}$  erhitzt. Häufig werden die in den genannten Aggregaten gewonnenen Produkte Niederbrand- und Hochbrand-Gips zu Mehrphasengips (Putzgips) werkmäßig vermischt.  $\alpha$ -Halbdhydrat-Gips wird unter Druck in Autoklaven bei Temperaturen von 100 bis  $150^\circ\text{C}$  hergestellt [GIPS 2006]

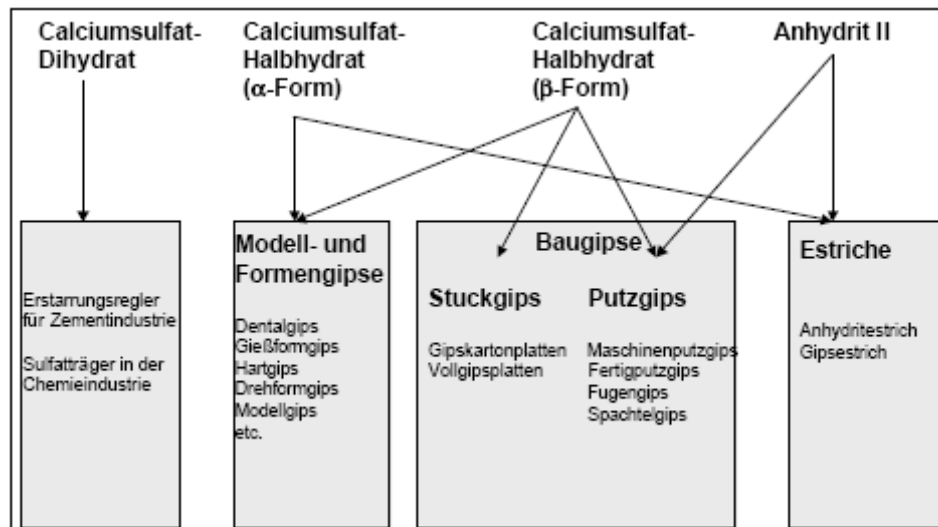
**Tabelle 2.2: Brennaggregate zur Gipsherstellung [GIPS 2006]**

Herstellungsaggregat	Gipstyp	Verwendung zur Herstellung von
Drehofen	$\beta$ -Halbdhydrat (Stuckgips)	Gipsbauplatten, Baugipsen
Großkocher	$\beta$ -Halbdhydrat (Stuckgips)	Gipsbauplatten, Baugipsen
Rostbandofen	Mehrphasengips (Putzgips)	Maschinenputzgips, Putzgips
Trägergas-Brennanlage	Mehrphasengips	Maschinenputzgips, Gipsbauplatten
Autoklav	$\alpha$ -Halbdhydrat (Formgips)	Hartformgips, Formgips

Abbildung 2.2 zeigt schematisch die verschiedenen Herkünfte der Gipsrohstoffe und die Verarbeitungsprozesse, um die vier verschiedenen Bindemittel Anhydrit, Dihydrat,  $\alpha$ -Halbdhydrat und  $\beta$ -Halbdhydrat herzustellen.

### 2.1.3 Verwendung der Produkte

Die aus den verschiedenen Vorkommen hergestellten Produkte Calciumsulfatdihydrat, Calciumsulfathalbdhydrat ( $\alpha$ - und  $\beta$ -Form) sowie der Anhydrit werden beispielsweise als Stuckgips oder Bindemittel für Baugipse, Spezialgipse und Estriche, zur Herstellung von Gipsplatten und als Zuschlagstoff in der Zement- und Chemieindustrie verwendet. Abbildung 2.1 zeigt im Detail welche Form des Calciumsulfathydrats für welche Gipsprodukte und weitere Verwendungsarten benutzt werden.



**Abbildung 2.1: Verwendungsmöglichkeiten der verschiedenen Bindemittel aus Gips**  
[ARENDE 2000]

#### 2.1.4 Recycling und Entsorgungsmöglichkeiten

Gipshaltige Produktionsrückstände werden im Herstellwerk fast vollständig wieder in den Produktionsfluss eingeführt und auf diese Weise verwertet. An der Baustelle anfallende Rückstände von Baugips aller Art, die keine Fremdstoffe enthalten, werden nach Sorten getrennt vom Lieferwerk oder einer regionalen Sammelstelle zurückgenommen. Gleiches gilt auch für verbrauchte Gipsformen und -modelle. Für Gipsplatten, die nicht durch Fremdstoffe verunreinigt sind, soll ebenfalls eine solche Sammelstelle eingerichtet werden, um die Platten anschließend einer Wiederverwertung im Produktionsprozess zu zuführen.

Gipshaltiger Bauschutt soll in Aufbereitungsanlagen gesammelt und behandelt werden, sodass er je nach stofflicher Zusammensetzung und der dadurch gegebenen Eignung einer erneuten Verwertung zugeführt werden kann. Derartige Anlagen sind in allen Bundesländern bereits im Einsatz.

Besteht für gipshaltige Abfälle jeglicher Art keine Möglichkeit zur Wiederverwertung, so können solche Abfälle auf Bauschuttdeponien abgelagert werden. Allgemein kann gesagt werden, dass bei einer unvermeidlichen Verbringung von gipshaltigen Abfällen auf Deponien der Einfluss der Gipsreste auf Grund- und Oberflächenwasser mit dem Einfluss von Naturgips in Lagerstätten vergleichbar ist. [GIPS 2006]

#### 2.1.5 Situation der Gipsbranche

Nach Angaben des Bundesverbandes der Gipsindustrie e.V. arbeiteten im Jahr 2004 in Deutschland ca. 5.000 Beschäftigte in der Branche. Zudem leisten ca. 4.000 Mitarbeiter logistische Dienstleistungen für die Gipsindustrie oder arbeiten in Zulieferbetrieben. Ca. 3.000 Baustoffhändler vertreiben Gipsprodukte, die von ca. 55.000 Baufirmen verarbeitet werden [GIPS 2007, HANDELSBLATT 2005]. Im Vergleich zum Vorjahr ist bei der Gipsherstellung die Beschäftigtenzahl um 2,4 % zurückgegangen.



Die gesamte deutsche Gipsproduktion lag im Jahr 2004 bei ca. 9 Millionen Tonnen. Der Hauptabnehmer der Gipsindustrie ist die Bauindustrie mit ca. 98 %. Die wichtigsten Produktgruppen, die zusammen den größten Teil des Gipsmarktes ausmachen, sind Gips-/Gipsfaserplatten und Baugipse, einschließlich Estriche und Putze. Jährlich werden von der deutschen Gipsindustrie ca. 3 Millionen Tonnen Gips- und Gipsfaserplatten sowie ca. 3 Millionen Tonnen Baugipse produziert [GIPS 2007, HANDELSBLATT 2005].

Die 9 Millionen Tonnen Gips die in Deutschland im Jahr 2004 produziert wurden, stammen jeweils zu etwa 50 % aus Naturgipsstein (inklusive Naturanhydrit) und REA-Gips. Etwa 10% des abgebauten Naturgipses werden unter Tage abgebaut, es handelt sich dabei ausschließlich um Naturanhydrit. Aus dem abgebauten Naturgips und Naturanhydrit sowie dem REA-Gips werden die 4 verschiedenen Bindemittel Anhydrit-Mix, Dihydrat,  $\alpha$ -Halbhydrat und  $\beta$ -Halbhydrat hergestellt, die entweder direkt als Produkt oder zu Gipsprodukten weiterverarbeitet werden. Es werden jeweils 10% Anhydrit und Dihydrat, 76%  $\beta$ -Halbhydrat und 4%  $\alpha$ -Halbhydrat aus den verschiedenen Gipsressourcen produziert.

## 2.2 Systemgrenzen

Das Produktsystem umfasst die Herstellung der vier auf Calciumsulfat basierenden Bindemittel Anhydrit-Mix, Calciumsulfatdihydrat, Calciumsulfat  $\alpha$ -Halbhydrat und Calciumsulfat  $\beta$ -Halbhydrat. Als Rohstoffe für die Herstellung dienen die natürlichen Ressourcen Gipsstein und Anhydrit, Sulfatschlamm aus der Rauchgasentschwefelung in Kohlekraftwerken sowie das Koppelprodukt Synthetischer Anhydrit aus der Flusssäuresynthese. Der Sulfatschlamm aus der Rauchgasentschwefelung von Kohlekraftwerken fließt aufwendungsneutral in das Produktsystem ein und wird durch Entwässerung in Hydrozyklonen und Vakuumbandfilter zu REA-Gips mit einer Restfeuchte von 10% aufbereitet, siehe hierzu auch im Abschnitt Allokationen. Transportwege zwischen Kraftwerk, Gipsabbau, Koppelproduktion und den jeweiligen Verarbeitung (Aufbereitung, Brennen, Verpacken) werden im Produktsystem berücksichtigt.

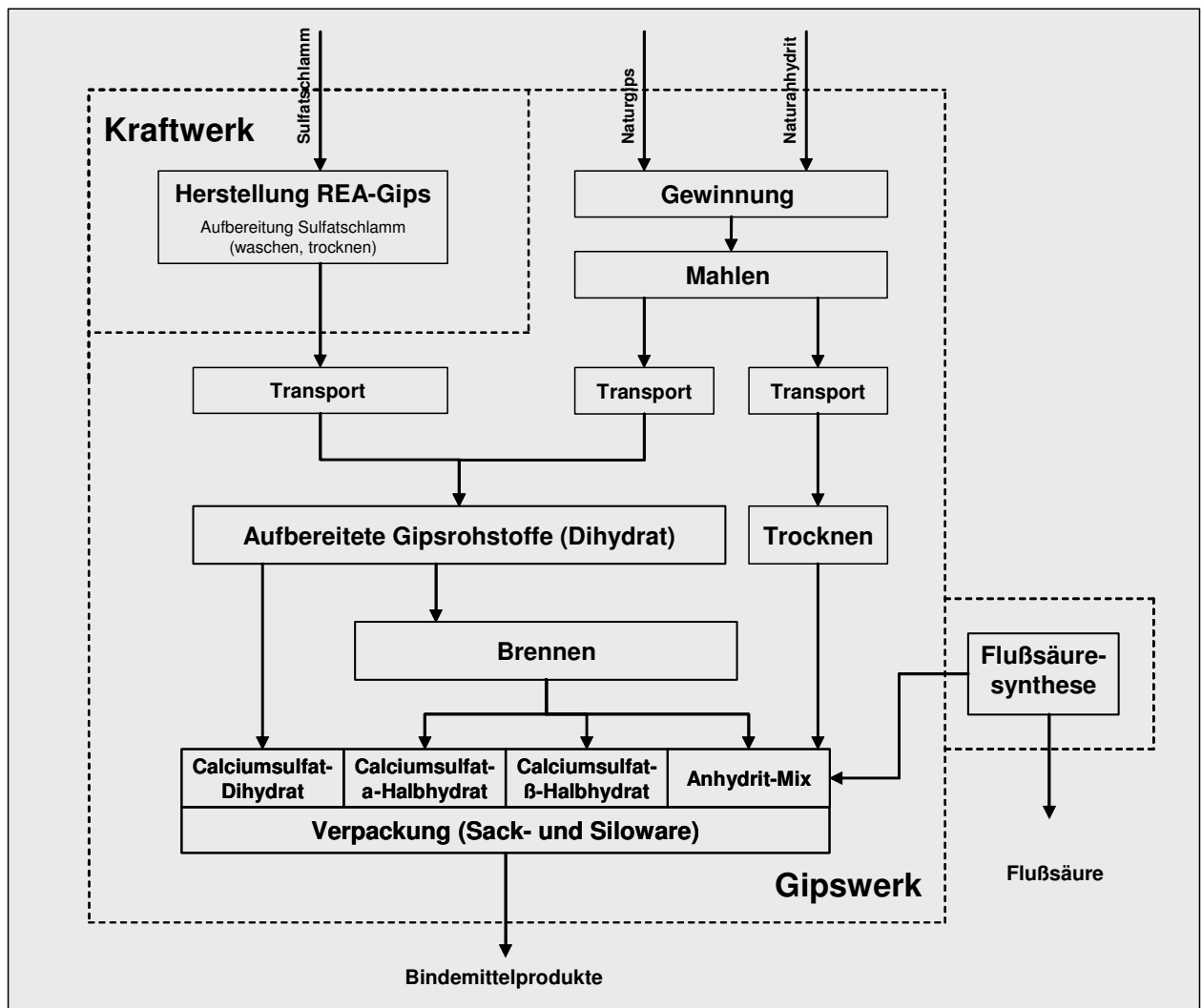


Abbildung 2.2: Produktsystem der Gipsherstellung

### 2.3 Abschneidekriterien

Prinzipiell darf die Summe der nicht berücksichtigten Stoff- und Energieflüsse eines Prozesses 5% nicht übersteigen. Einzelne Stoffflüsse, die in das Produktsystem fließen und mindestens 1% zum gesamten Massenfluss oder Primärenergiebedarf eines Produktsystems beitragen, wurden berücksichtigt. Das Gleiche gilt für Emissionen, die das Produktsystem verlassen und mindestens 1% des Wertes einer dargestellten Wirkungskategorie ausmachen.

### 2.4 Datenqualität

Die Daten für die Bilanzierung der verschiedenen auf Gips basierenden Bindemittel stammen überwiegend aus einer in 2007 aktualisierten Datenerhebung des Bundesverbandes der Gips- und Gipsbauplattenindustrie [GIPS 2007]. Für die Datenerhebung wurden Prozessdaten aus insgesamt sechs modernen Gipswerken unter Einbeziehung von Literaturdaten zur statistischen Absicherung verwendet. Die sechs Werke decken einen



nicht unerheblichen Teil der Produktion in Deutschland ab, die Daten können deshalb als besonders repräsentativ angesehen werden. Die Daten für die Herstellung des Fluoroanhydrit stammen aus der Datenbank der LCA-Software GaBi 4 [GABI 2006]. Unsicherheiten in der Datenqualität können hier durch die Anwendung einer Allokation zur Bilanzierung der Koppelproduktion entstehen.

## 2.5 Allokationen

Die Allokation des Aufwands und der Umweltwirkungen für Koppelprodukte (z. B. Fluoroanhydrit aus der Flusssäuresynthese) wurden nach dem ökonomischen Wert der Produkte durchgeführt.

Bei der Bilanzierung des REA-Gipses wird der bei der Rauchgasentschwefelung anfallende Sulfatschlamm nicht als Koppelprodukt der Stromerzeugung betrachtet. Der Sulfatschlamm selbst ist kein verwertbares Produkt und wird erst durch seine spezielle Aufbereitung verwertbar. Der Sulfatschlamm fließt deshalb aufwendungsneutral, das heißt mit keinerlei Aufwendung und Umweltwirkungen, in das Produktssystem der Gipsherstellung ein. Für die Aufbereitung des Sulfatschlammes in Vakuumbandfiltern werden zwischen 16 und 28 kWh Strom pro Tonne Gips mit einer Restfeuchte von 10% benötigt. Für die Bilanzierung wurde ein Mittelwert von 22 kWh/t verwendet [GREIBL 2007].

## 2.6 Prozessdaten

Die Prozessdaten stammen, mit Ausnahme der Vorketten überwiegend aus der Datenerhebung des Bundesverbandes der Gips- und Gipsbauplattenindustrie [GIPS 2007]. In den nachfolgenden Tabellen sind die wesentlichen Input- und Outputströme für den Abbau und die Herstellung von Bindemitteln auf Gipsbasis dargestellt. Die Massenströme beziehen sich jeweils auf eine Tonne Produkt bzw. Zwischenprodukt. Transporte per LKW, Zug oder Schiff fallen zwischen Gipslagerstätte und Gipswerk in der Regel nicht an, da sich die Gipswerke unmittelbar an der Gipslagerstätte befinden. Transporte von REA-Gips fallen vor allem zwischen Kraftwerken in den neuen Bundesländern und Gipswerken in den alten Bundesländern statt. Die Transporte werden überwiegend mit dem Zug durchgeführt. Von den 7,5 Millionen Tonnen REA-Gips, die im Jahr 2006 produziert wurden, wurden von der Railion AG etwas mehr als 2 Millionen Tonnen transportiert [KERSTEN 2007]. Für die Bilanzierung wird angenommen, dass ein Drittel des REA-Gipses mit der Bahn transportiert wird und der Rest ohne Transport in Gipswerken, die sich direkt an Kohlekraftwerken befinden, verarbeitet wird. Für den Schienentransport ergibt sich eine mittlere Distanz von 275 km [GIPS 2007]. Der Transport von REA-Gips mittels Binnenschiffen von Kohlekraftwerken im Ruhrgebiet zu Gipswerken konnte aufgrund fehlender Daten nicht berücksichtigt werden. Interne Transporte mittels Baumaschinen oder Förderbänder sind in den jeweiligen Herstellungsprozessen enthalten.




**Tabelle 2.3: Massenströme für 1t Dihydrat**

<b>Dihydrat (Naturgips) aus Tagebau</b>			
<i>Input</i>			
<b>Ressourcen</b>	Gipsstein	1000	kg
<b>Betriebsmittel</b>	Schmieröl	0,018	kg
	Diesel	0,30	kg
	Sprengstoff	0,13	kg
<b>Energie</b>	Strom	5,7	MJ
<i>Output</i>			
<b>Produkt</b>	Dihydrat (Naturgips)	1	t

Transporte per LKW, Zug oder Schiff fallen zwischen Gipslagerstätte und Gipswerk in der Regel nicht an, da sich die Gipswerke unmittelbar an der Gipslagerstätte befinden. Transporte von REA-Gips fallen vor allem zwischen Kraftwerken in den neuen Bundesländern und Gipswerken in den alten Bundesländern statt. Die Transporte werden überwiegend mit dem Zug durchgeführt. Von den 7,5 Millionen Tonnen REA-Gips, die im Jahr 2006 produziert wurden, wurden von der Railion AG etwas mehr als 2 Millionen Tonnen transportiert [Kersten 2007]. Für die Bilanzierung wird angenommen, dass ein Drittel des REA-Gipses mit der Bahn transportiert wird und der Rest ohne Transport in Gipswerken, die sich direkt an Kohlekraftwerken befinden, verarbeitet wird. Für den Schienentransport ergibt sich eine mittlere Distanz von 275 km [GIPS 2007]. Der Transport von REA-Gips mittels Binnenschiffen von Kohlekraftwerken im Ruhrgebiet zu Gipswerken konnte aufgrund fehlender Daten nicht berücksichtigt werden. Interne Transporte mittels Baumaschinen oder Förderbänder sind in den jeweiligen Herstellungsprozessen enthalten.

Tabelle 2.3 zeigt die Massenströme für den Abbau von Naturgipsstein. Nach Angaben des Bundesverbandes der Gips- und Gipsbauplattenindustrie wird Naturgips (Dihydrat) in Deutschland ausschließlich im Tagebau gefördert. Der Prozess umfasst die gesamte Rohstoffaufbereitung inklusive Sprengen, Brechen und Mahlen. Für die Bereitstellung der Betriebsmittel und der Energie wurden LCA Datensätze der LCA Software GaBi 4 [GABI 2006] verwendet. Für die Bereitstellung des Stromes wurde, wie für alle anderen Produkte, ein Deutscher Strommix verwendet. Der Diesel wird in verschiedenen, für den Abbau und die Aufbereitung benötigten Baumaschinen als Kraftstoff verwendet. Für die Verbrennung des Diesels und die entstehenden Emissionen wurde ein generischer Dieselverbrennungsprozess für Baumaschinen verwendet, der auch für alle weiteren Prozesse in denen Diesel für Baumaschinen benötigt wird verwendet wurde. Die verwendeten Emissionsfaktoren für Baumaschinen sind in Tabelle 2.4 wiedergegeben.

**Tabelle 2.4: Emissionsfaktoren für die Dieselverbrennung in Baumaschinen**

<b>Emissionsfaktoren Dieselverbrennung Baumaschine (kg/kg Diesel)</b>	
Kohlendioxid	3,16
Kohlenmonoxid	0,016
NMVOG	0,0053
Schwefeldioxid	0,0040
Stickoxide	0,051
Staub (PM 10)	0,00047
Staub (PM 2,5)	0,0024
Staub unspezifisch	0,00063





Tabelle 2.5 zeigt die Massenströme für die Herstellung von  $\beta$ - und  $\alpha$ -Halbhydrat dar. Für die Produktion von  $\beta$ -Halbhydrat wird in den untersuchten Werken in Deutschland zu 45% abgebauter Dihydrat bzw. Naturgips und zu 55% REA-Gips (auf trockenem Gips bezogen) verwendet. Der in Luft emittierte Wasserdampf entsteht im Brennprozess zum einem durch die Verdampfung der freien Feuchte im REA-Gips sowie durch die Reduzierung des Kristallwassers von zwei Molekülen Wasser auf ein halbes Molekül Wasser pro Gipsmolekül. In den betrachteten Gipswerken mit  $\beta$ -Halbhydratproduktion werden 80% der Gipsrohstoffe mit dem Energieträger Erdgas und 20% mit Heizöl (extra leicht) gebrannt.

**Tabelle 2.5: Massenströme für 1t  $\beta$ - und  $\alpha$ -Halbhydrat**

<b>Halbhydrat</b>				
<i>Input</i>				
		$\beta$ -Halbhydrat	$\alpha$ -Halbhydrat	
<b>Rohstoffe</b>	Dihydrat (Naturgips)	525	0	kg
	REA Gips (10% freie Feuchte)	732	1367	kg
<b>Betriebsmittel</b>	Schmieröl	1,8E-06	0,0008	kg
	Wasser	0	242	kg
<b>Energie</b>	Strom	92,5	154	MJ
	Thermische Energie aus Erdgas	801	1162	MJ
	Thermische Energie aus Heizöl (el)	250	1162	MJ
<i>Output</i>				
<b>Produkt</b>	$\beta$ -Halbhydrat	1	1	t
<b>Emissionen (in Luft)</b>	Wasserdampf	259	609	kg
<b>Abfälle</b>	Hausmüllähnliche Abfälle zur Verbrennung	0,020	0,022	kg
	mineralische Aufbereitungsrückstände zur Deponie	0,13	0,137	kg

Für die Herstellung von  $\alpha$ -Halbhydrat wird REA-Gips als Gipsrohstoff verwendet. Bei der Umwandlung des REA-Gipses in  $\alpha$ -Halbhydrat wird *Netzwasser* zugegeben, das zusammen mit der freien Feuchte und drei Viertel des Kristallwassers als Wasserdampf in Luft emittiert wird. Der Bedarf an thermischer Energie für das Brennen des  $\alpha$ -Halbhydrat bzw. hochfester Gipsprodukte ist etwa doppelt so hoch wie für den  $\beta$ -Halbhydrat und wird im betrachteten Gipswerk jeweils zur Hälfte mit Erdgas und Heizöl (extra leicht) bereitgestellt.

In Tabelle 2.6 und Tabelle 2.7 sind die Massenströme für die Herstellung von Anhydrit aus verschiedenen Herstellungswegen dargestellt. Naturanhydrit wird sowohl im Tagebau als auch im Bergwerk abgebaut. Die Prozesse des Naturanhydritabbaus umfassen die Förderung und Aufbereitung des geförderten Anhydrits (Sprengen, Brechen, Mahlen). Nur ein Teil des geförderten Anhydrits, der Anteil wurde mit 60% abgeschätzt, muss getrocknet werden. Anhydrit der unter Tage gewonnen wird, wird fast absolut trocken (< 1% freie Feuchte) gefördert. Gegenüber Anhydrit aus dem Tagebau muss deutlich weniger thermischer Energie für die Trocknung eingesetzt werden, als für Anhydrit aus dem Tagebau.



Tabelle 2.6: Massenströme für 1t Anhydrit (Bergwerk, Tagebau und thermisch)

Anhydrit (aus Naturanhydrit)					
Input					
		Bergwerk	Tagebau	thermisch	
<b>Rohstoffe</b>	Anhydritstein aus Bergwerk	1000	0	0	kg
	Anhydritstein aus Tagebau	0	1000	0	kg
	REA Gips (10% freie Feuchte)	0	0	1391	kg
<b>Betriebsmittel</b>	Sprengstoff	0,67	0,12	0	kg
	Schmieröl	0,008	0,020	1,8E-06	kg
	Diesel	0,29	0,31	0	kg
	Wasser	6,0	20,4	0	kg
<b>Energie</b>	Strom	59,4	167,1	92,5	MJ
	Thermische Energie aus Erdgas	65,3	220,9	1555,1	MJ
Output					
<b>Produkt</b>	Anhydrit (aus Naturanhydrit)	1	1	1	t
<b>Emissionen (in Luft)</b>	Wasserdampf	6,0	20,4	391,0	kg
<b>Abfälle</b>	Hausmüllähnliche Abfälle zur Verbrennung	0,9	1,0	0,02	kg
	Gipsabfälle zur Verwertung	0,0046	0,0049	0,13	kg

Thermischer Anhydrit wird bei etwa 800 °C durch Brennen von REA-Gips gewonnen. Durch das Verdampfen der freien Feuchte und des Kristallwassers des REA-Gipses werden insgesamt 391 kg Wasserdampf pro Tonne thermischem Anhydrit in die Luft emittiert.

In Tabelle 2.7 sind die Massenströme für die Herstellung von technischem Anhydrit aus der Flusssäuresynthese dargestellt. Aufgrund der Allokation, die für die Aufteilung der Massenströme auf das Produkt Flusssäure und das Koppelprodukt Anhydrit angewendet wurde, ist die Massenbilanz nicht geschlossen. Prozess beinhaltet sämtliche Aufwendungen für die Aufbereitung des Koppelproduktes Anhydrit zu einem marktfähigen Produkt. Für die Allokation wurde nach Absprache mit einem Hersteller für Flusssäure in Deutschland ein Preisverhältnis von 20 zu 1 zwischen Flusssäure und technischem Anhydrit angewendet [WEIB 2007].

Tabelle 2.7: Massenströme für 1t technischen Anhydrit aus der Flusssäuresynthese

technischer Anhydrit (Koppelprodukt aus Flusssäuresynthese)		
Input		
<b>Rohstoffe</b>	Flußspat	91,6 kg
	Schwefelsäure (96%)	108,0 kg
<b>Betriebsmittel</b>	Natronlauge	0,84 kg
<b>Energie</b>	Strom	197,5 MJ
	Dampf aus Erdgas	295,4 MJ
Output		
<b>Produkt</b>	Anhydrit aus Flußsäuresynthese (aufbereitet)	1 t
<b>Emissionen (in Luft)</b>	Fluorwasserstoff	0,0001 kg
	Schwefeldioxid	0,01 kg
	Staub (unspezifisch)	0,001 kg
<b>Emissionen (in Frischwasser)</b>	Calcium	0,0001 kg
	Fluorid	0,01 kg
<b>Abfälle</b>	Hausmüllähnliche Abfälle zur Verbrennung	1,2 kg

Der Anhydrit aus den verschiedenen Herstellungswegen wird für die Bereitstellung eines LCA Datensatzes zu einem Anhydrit-Mix zusammen gemischt. Der Anhydrit-Mix setzt sich zu jeweils einem Drittel aus Naturanhydrit, thermischen Anhydrit und technischem Anhydrit zusammen. Beim Naturanhydrit werden 60% im Bergwerk abgebaut und 40% im Tagebau.

### 3 Ergebnisse der Sach- und Wirkungsbilanz

#### 3.1 Sachbilanz

In Tabelle 3.1 sind ausgewählte Ergebnisse der Sachbilanz, jeweils bezogen auf eine Tonne, in Absolutwerten für die vier verschiedenen Gipsbindemittel dargestellt. Aufgrund der sehr unterschiedlichen Werte für die einzelnen Bindemittel, wird in den nachfolgenden Diagrammen 3.1-3.3 näher darauf eingegangen welche Prozesse bzw. Herstellungswege für die Ergebnisse der Sachbilanz verantwortlich sind. Im Anhang A ist eine umfangreiche Tabelle mit Sachbilanzergebnissen für die vier verschiedenen Bindemittel dargestellt. Kriterium für die Auswahl der gezeigten Ressourcen und Emissionen ist, dass die jeweilige Ressource oder Emission mindestens 1% zu einer der in der Wirkungsabschätzung verwendeten Wirkungskategorien beiträgt. Zusätzlich wurden wichtige Emissionen wie Schwermetalle und Dioxin unabhängig von ihrer Relevanz in diese Liste aufgenommen.

Bei der Herstellung von Dihydrat aus Naturgips ergeben sich die Sachbilanzergebnisse und die damit verbundenen Emissionen und Ressourcenverbräuche ausschließlich aus dem Abbau des Dihydrats. Tabelle 2.3 gibt Auskunft über die Massenströme zur Herstellung von Dihydrat aus dem Tagebau.

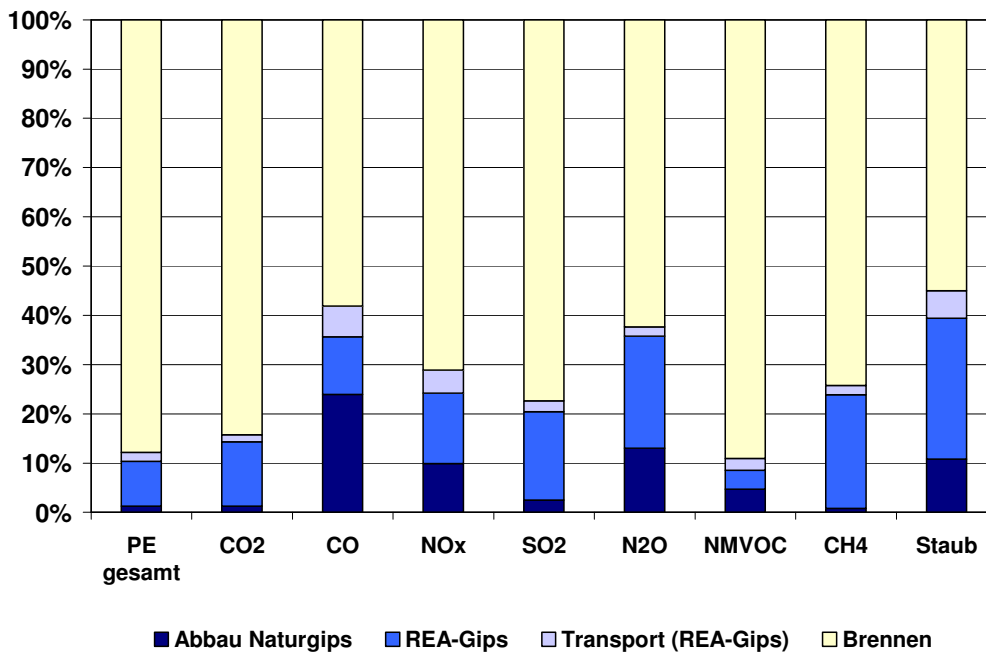
**Tabelle 3.1: Ausgewählte Sachbilanzergebnisse für Bindemittel aus Gips**

Produkt		Dihydrat (Naturgips)	β- Halbhydrat	α- Halbhydrat	Anhydrit- Mix
Input					
PE gesamt	MJ	38,1	1638	3589	1809
PE nicht erneuerbar	MJ	37,1	1620	3559	1783
PE erneuerbar	MJ	0,94	17	29	26
Output (Emissionen in Luft)					
CO <sub>2</sub>	kg	2,38	101	230	92
CO	kg	0,0095	0,021	0,039	0,032
NO <sub>x</sub>	kg	0,018	0,097	0,20	0,13
SO <sub>2</sub>	kg	0,0032	0,066	0,15	0,36
N <sub>2</sub> O	kg	0,0006	0,0025	0,0047	0,0029
NMVOG	kg	0,0019	0,022	0,054	0,024
CH <sub>4</sub>	kg	0,0036	0,23	0,47	0,24

Die Herstellung von β-Halbhydrat erfolgt durch Brennen von Dihydrat. Neben der Bereitstellung des Dihydrats ergeben sich Emissionen aus dem Brennprozess sowie dem gesamten Handling der Gipsströme.

Abbildung 3.1 zeigt die prozentualen Anteile der Dihydratbereitstellung und des Brennprozess an den gesamten Emissionen in Luft, die für die Auswertung ausgewählt worden

sowie für den Primärenergieverbrauch. Dominanter Faktor bei der Herstellung des  $\beta$ -Halbhydrat ist das Brennen des Dihydrats zum Halbhydrat. Der Abbau des Naturgipses wird bei solchen Emissionen bedeutsamer, die bei der Verbrennung von Diesel in Baumaschinen deutlich stärker pro Energieeinheit emittiert werden als bei der Verbrennung von Erdgas und Heizöl für die Bereitstellung von thermischer Energie. Dies sind vor allem Kohlenmonoxid, Lachgas und Staub.



**Abbildung 3.1: Ausgewählte Sachbilanzergebnisse für  $\beta$ -Halbhydrat**

Die Ergebnisse für  $\alpha$ -Halbhydrat unterscheiden sich durch den deutlich höheren Energiebedarf für das Brennen, siehe hierzu Abbildung 3.1. Entsprechend ist der Anteil der Emissionen und des Primärenergiebedarfs für den Brennprozess an den Gesamtemissionen, der in Abbildung 3.2 dargestellt ist, noch größer als für den  $\beta$ -Halbhydrat. Unterschiede ergeben sich gegenüber dem  $\beta$ -Halbhydrat auch durch die alleinige Verwendung von REA-Gips als Rohstoff.

Für den Anhydrit-Mix, der zu jeweils einem Drittel aus Naturanhydrit, thermischem Anhydrit und synthetischem Anhydrit hergestellt wird, zeigt sich, dass der synthetische Anhydrit überproportional zu den Emissionen und zum Primärenergiebedarf beiträgt. Besonders ausgeprägt ist dies für Schwefeldioxid, das zu großen Teilen bei der Schwefelsäureherstellung emittiert wird und Staub, der bei der Produktion des Flussspates freigesetzt wird. Einzige Ausnahme bildet Lachgas das sich proportional zur Aufteilung des Anhydrit-Mix verhält. An dieser Stelle sei noch mal erwähnt, dass sich die Bilanzierung der Emissionen beim synthetischen Anhydrit auf eine Allokation bei der Flußsäuresynthese beziehen, die mit Hilfe von Preisdaten für Flußsäure und das Koppelprodukt Gips durchgeführt wurde. Entsprechend bestehen für die Bilanzierung des synthetischen Anhydrits gewisse Unsicherheiten.

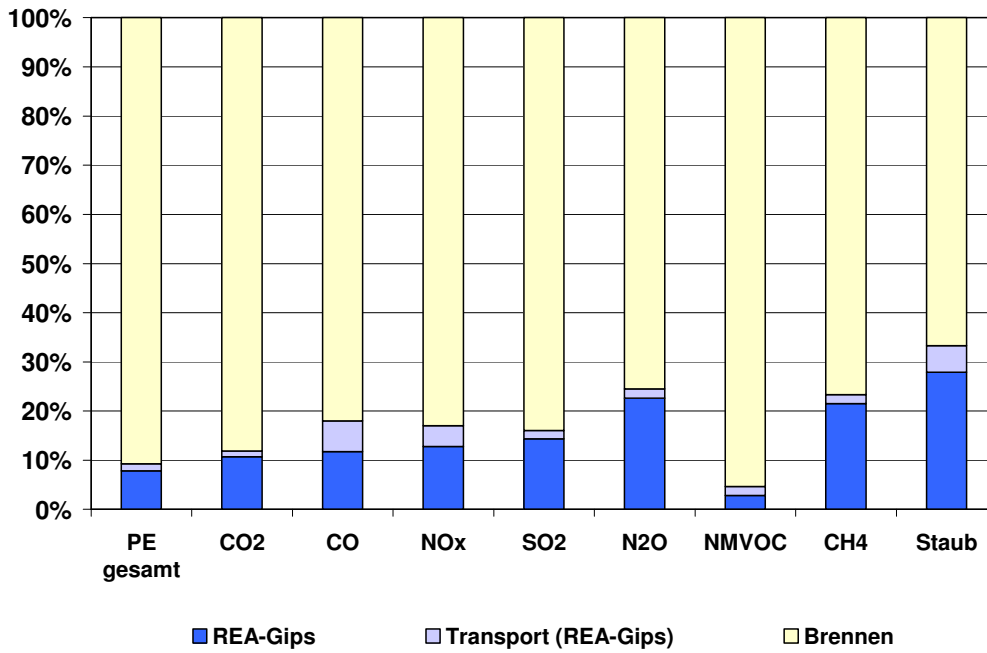


Abbildung 3.2: Ausgewählte Sachbilanzergebnisse für  $\alpha$ -Halbhydrat

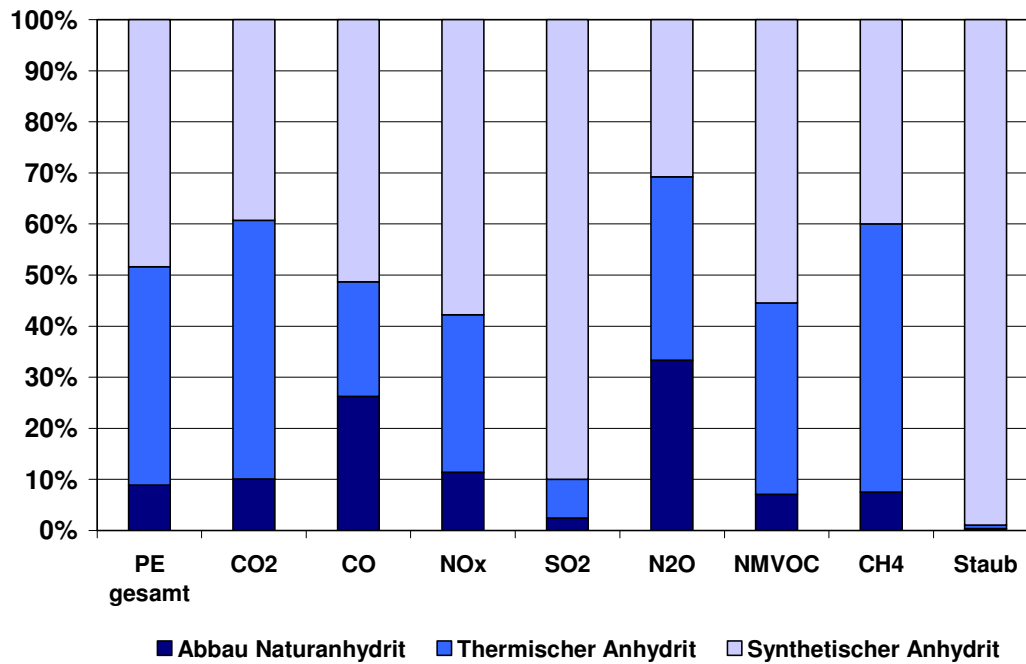


Abbildung 3.3: Ausgewählte Sachbilanzergebnisse für Anhydrit-Mix



### 3.2 Wirkungsbilanz und Plausibilitätsbetrachtungen

Die Wirkungsabschätzung erfolgt auf Basis von Charakterisierungsfaktoren der Universität Leiden aus dem Jahr 2001 (CML 2001).

Folgende Wirkkategorien werden betrachtet:

- Abiotischer Ressourcenverbrauch (ADP) [kg Sb-Äquiv.]
- Treibhauspotenzial (GWP<sub>100</sub>) [kg CO<sub>2</sub>-Äquiv.]
- Versauerungspotenzial (AP) [kg AP-Äquiv.]
- Eutrophierungspotenzial (EP) [kg Phosphat-Äquiv.]
- Photochemisches Oxidantienbildungspotenzial (POCP) [kg Ethen-Äquiv.]

Zur Plausibilitätsprüfung und Sensibilitätsabschätzung werden darüber hinaus folgende CML-Kategorien betrachtet:

- Humantoxizitätspotenzial (HTP) [kg DCB-Äquiv.]
- Aquatisches Frischwasser Ökotoxpotenzial (FAETP) [kg DCB-Äquiv.]
- Aquatisches Salzwasser Ökotoxpotenzial (MAETP) [kg DCB-Äquiv.]
- Terrestrisches Ökotoxizitätspotenzial (TETP) [kg DCB-Äquiv.]

Die Autoren sind sich bewusst, dass die Gültigkeit dieser Toxizitätspotentiale heute noch mit hohen Unsicherheiten behaftet ist. Die humantoxische Wirkung von Substanzen erfolgt oft über Ingestion (Nahrungskette) oder durch Inhalation (Einatmen) und gerade die Weiterentwicklung und Berechnung der Ausbreitungs- und Expositionsmodelle zum Menschen und in der Ökosphäre wird von Wissenschaftlern, die sich mit der Wirkungsanalyse in der LCA-Methodik beschäftigen, als schwierig angesehen.

Tabelle 3.2 zeigt die Umweltwirkungen der ausgewerteten Wirkungskategorien jeweils für die Herstellung von einer Tonne der vier Bindemittel in Absolutwerten. In den nachfolgenden Diagrammen sind die Umweltwirkungen, wie bereits in der Sachbilanz, anteilig nach Bereitstellung des Dihydrats und des Brennprozess bzw. für den Anhydrit nach Herstellungsweg prozentual dargestellt.



Tabelle 3.2: Wirkungsbilanzergebnisse für Bindemittel aus Gips

Produkt		Dihydrat (Naturgips)	β- Halbhydrat	α- Halbhydrat	Anhydrit- Mix
<b>Input</b>					
ADP	kg Sb-Äqv.	0,081	0,75	1,6	0,79
<b>Output</b>					
GWP	kg CO <sub>2</sub> -Äqv.	2,7	107	242	99
EP	kg Phosphat-Äqv.	0,0026	0,015	0,030	0,020
AP	kg SO <sub>2</sub> -Äqv.	0,017	0,14	0,30	0,46
POCP	kg Ethen-Äqv.	0,0016	0,013	0,031	0,030
ODP	kg R11-Äqv.	0,00000019	0,0000035	0,0000058	0,0000052

Tabelle 3.3: Wirkungsbilanzergebnisse der Toxizitätspotentiale für Bindemittel aus Gips

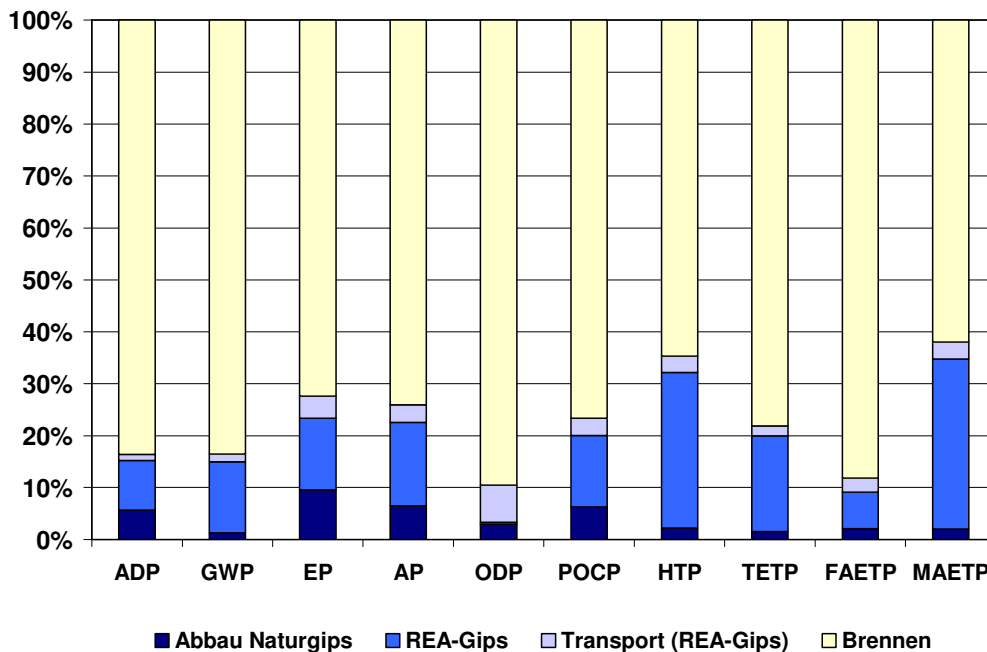
Produkt		Dihydrat (Naturgips)	β- Halbhydrat	α- Halbhydrat	Anhydrit- Mix
HTP	kg DCB-Äqv.	0,068	1,6	3,4	6,2
TETP	kg DCB-Äqv.	0,0016	0,055	0,13	0,19
FAETP	kg DCB-Äqv.	0,0036	0,091	0,25	0,41
MAETP	kg DCB-Äqv.	124	3258	6509	22592

### Dihydrat aus Naturgips

Das ADP für den Dihydrat ergibt sich überwiegend (82%) aus der Entnahme des Gipssteins aus Gipslagerstätten. Das GWP ergibt sich zu 90% aus der Emission von Kohlendioxid, das bei der Bereitstellung von Strom und der bei der Verbrennung von Diesel in Baumaschinen emittiert wird. Weitere 7% ergeben sich durch die Emission von Lachgas bei der Bereitstellung des Sprengstoffes. Das Versauerungspotential wird überwiegend durch Stickoxidemissionen der Baumaschinen (63%) sowie durch Schwefeldioxidemissionen bei der Strombereitstellung und bei den Baumaschinen verursacht. Ähnlich wie das AP wird das EP mehrheitlich durch Stickoxidemissionen der Baumaschinen bestimmt (75%). Beim POCP führen NMVOC, CO, SO<sub>2</sub>, und NO<sub>x</sub> Emissionen der Baumaschinen zusammen zu etwa 70% zu den Umweltwirkungen. Die Bereitstellung des Sprengstoffes verursacht etwa 13%, hauptsächlich durch Emissionen von Kohlendioxid. Das FAETP ergibt sich mehrheitlich durch die Emission von Schwermetallen in Frischwasser (52%) und in Luft (32%), größte Anteile daran haben die Strombereitstellung und die Dieselbe-

reitstellung. Hauptkontributoren zum HTP sind Schwermetalle in Luft (39%), hauptsächlich durch die Strombereitstellung, sowie Stickoxide aus der Verbrennung von Diesel in Baumaschinen (27%).

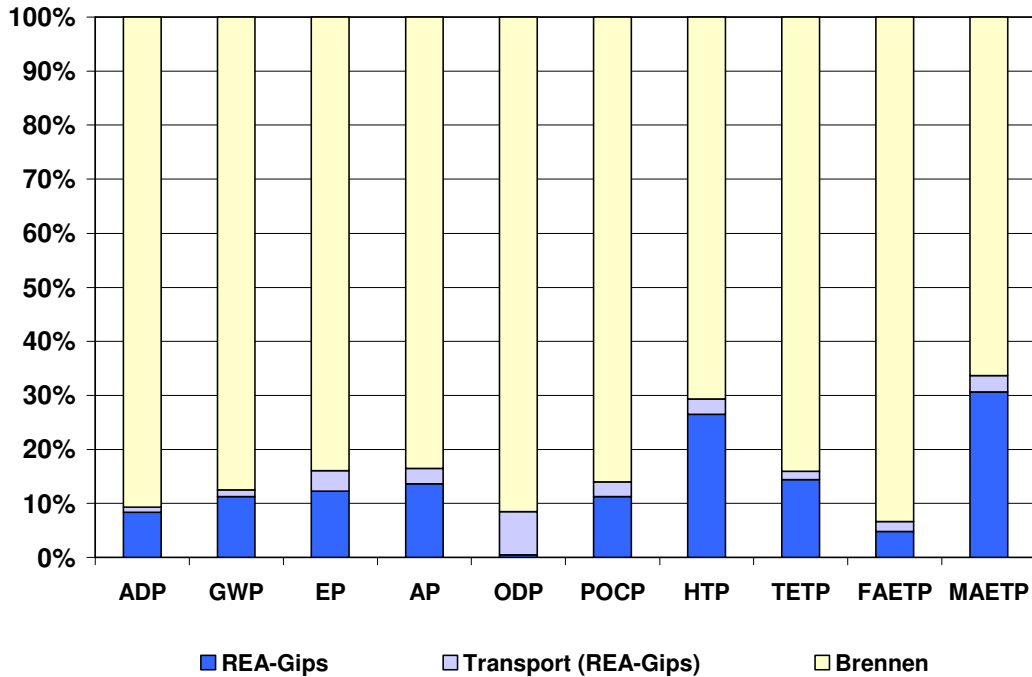
Die Wirkungsbilanz für  $\beta$ -Halbhydrat zeigt in Abbildung 3.4, dass der Brennprozess für alle Wirkungskategorien dominant ist. Das ADP verteilt sich zu 70% auf die Bereitstellung von thermischer Energie für den Brennprozess und zu 10% auf die Bereitstellung von Strom für den Brennprozess und das Handling des Gipses beim Brennprozess. Der Rest entfällt auf die Bereitstellung des Gipsrohstoffes. GWP, AP EP und POCP verhalten sich ähnlich wie das ADP und werden vor allem durch die Bereitstellung von thermischer Energie dominiert. Allerdings erhöht sich der Anteil für die Strombereitstellung beim Brennprozess für diese vier Wirkungskategorien leicht. Die Wirkungskategorie ODP ist wenig aussagekräftig, da sich durch das Verbot der Verwendung von ozonschädlichen halogenierten Kohlenwasserstoffen kaum noch schädliche Substanzen emittiert werden und entsprechend keine Auswirkungen vorhanden sein dürften. So beruht das ODP hier vor allem auf einzelnen Hintergrunddaten für die Uranaufbereitung, die nicht aktualisiert vorliegen. Dies ist auch der Fall für alle weiteren Wirkungsbilanzen der verschiedenen Bindemittel.



**Abbildung 3.4: Wirkungsbilanzergebnisse für  $\beta$ -Halbhydrat**

Die Wirkungsbilanz für  $\alpha$ -Halbhydrat zeigt wie bereits bei der Sachbilanz eine klare Dominanz des Brennprozesses. Durch den höheren Energieverbrauch beim Brennprozess sind die Wirkungen in absoluten Zahlen deutlich größer als beim  $\beta$ -Halbhydrat (siehe Tabelle 3.2). Dabei hat beim Brennprozess die Bereitstellung von thermischer Energie wie bereits beim  $\beta$ -Halbhydrat den Hauptanteil. Etwa 70-80% der Wirkungen der Kategorien ADP, GWP, AP, EP und POCP entfallen auf die Bereitstellung von thermischer Energie. Weitere 10-15% entfallen auf die Strombereitstellung für den Brennprozess und das Handling der Gipsströme beim Brennprozess.





**Abbildung 3.5: Wirkungsbilanzergebnisse für  $\alpha$ -Halbhydrat**

Die Wirkungsbilanz des Anhydrit-Mix zeigt, dass der Anteil des Naturanhydrits an den Wirkungen deutlich unter dem Anteil am Mix (33%) liegt. Vor allem bei den Toxizitätskategorien sind die Anteile sehr gering. Anteile des ADP und GWP sind für den thermischen und synthetischen Anhydrit in ähnlicher Größenordnung. Die Dominanz des synthetischen Anhydrits bei den Toxizitätspotentialen liegt zum einen in der Emission von Flußsäure bei der Flußsäuresynthese sowie bei der Herstellung von Flußspat begründet.

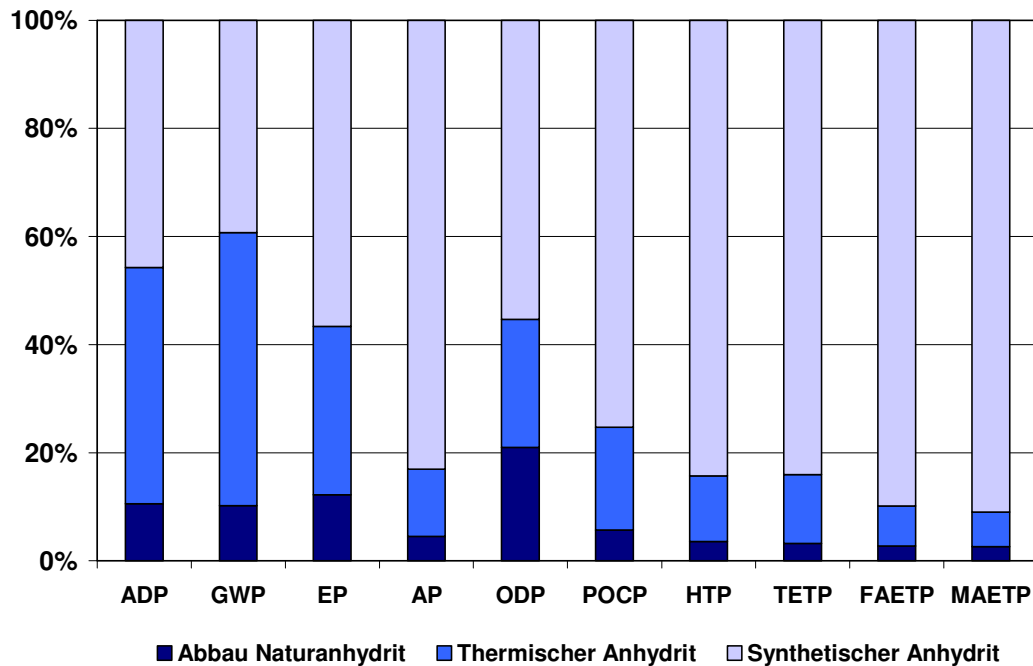


Abbildung 3.6: Wirkungsbilanzergebnisse für Anhydrit-Mix

## 4 Anwendungsmöglichkeiten der Ergebnisse

Die Gültigkeit der Datensätze bezieht sich auf Deutschland, da Vorketten, die Bereitstellung von Gipsrohstoffen sowie die Werksdaten stark durch die Rahmenbedingungen der deutschen Gipsindustrie beeinflusst sind (REA-Gips aus Kohlekraftwerken, Gipsvorkommen, Transportdistanzen etc.). Die Daten sollten nicht dafür verwendet werden Naturgips und REA-Gips oder Naturanhydrit, thermischen Anhydrit und synthetischen Anhydrit miteinander zu vergleichen. Durch die allokatonsbedingte Preissensibilität der Umweltwirkungen für die Koppelproduktion von Anhydrit aus der Flusssäuresynthese bzw. der Diskussion um Schonung der heimischen Gipsressourcen, Flächenverbrauch sowie der anderweitigen Entsorgung der Gips suspension aus der Rauchgasentschwefelung lässt sich eine solcher Vergleich nicht durch diese Untersuchung stützen.

Die erstellten Lebenszyklusinventare können für die Untersuchung baulicher Vorhaben sowie für die Bilanzierung von Gipsprodukten, die im Wesentlichen aus den vier bilanzierten Bindemitteln bestehen, verwendet werden. Dies können im Einzelnen die Herstellung von beispielsweise Fließestrichen direkt am zu bilanzierenden Bauvorhaben oder die Produktion von Gipsplatten.

## 5 Fortschreibung und Aktualisierung der Daten

Die mod3ellierte Datensätze sollten in der Zukunft gepflegt und wenn nötig angepasst werden. Insbesondere Energievorketten sollten in Abhängigkeit vorhandener Update ü-

berprüft und gegebenenfalls ausgetauscht werden. Inwieweit sich Verbesserungen in der Energieeffizienz der Brennprozesse ergeben ist nicht bekannt, sollte aber innerhalb eines Zeitraumes von fünf Jahren überprüft werden. Wichtig ist vor allem auch Marktdaten, insbesondere die Zusammensetzung der verschiedenen Herkünfte von Gipsressourcen in einem ähnlichen Zeitraum zu überprüfen, da sich insbesondere bei REA-Gips und synthetischem Anhydrit durch Veränderung der Aktivität von Kohlekraftwerken oder Werken zur Herstellung von Flusssäure die Verfügbarkeit des technischen Gipses verändern kann.



## 6 Literaturverzeichnis

- ARENDRT 2000 M. Arendt: Kreislaufwirtschaft im Baubereich: Steuerung zukünftiger Stoffströme am Beispiel von Gips, Dissertation, Karlsruhe 2000
- CML 2001 CML's impact assessment methods and characterisation factors Leiden University, Institute of Environmental Science (CML). Online: URL: <http://www.leidenuniv.nl/cml/ssp/databases/cmlia/>
- GREIBL 2007 O. Greißl: Stromverbrauch für die Aufbereitung von Gipssuspensionen in Kohlekraftwerken, Schriftliche Kommunikation, EnBW Kraftwerke AG, 2007
- GABI 2006 GaBi 4: Software und Datenbank zur Ganzheitlichen Bilanzierung. IKP, Universität Stuttgart und PE Europe GmbH, Leinfelden-Echterdingen, 2006
- GIPS 2006 Bundesverband der Gips- und Gipsplattenindustrie e.V.: Gips-Datenbuch, Bundesverband der Gips- und Gipsplattenindustrie e.V., Darmstadt, 2006
- GIPS 2007 Bundesverband der Gips- und Gipsplattenindustrie e.V.: Datenerhebung in Gipswerken, aktualisierte Version 2007
- HANDELSBLATT 2005 Handelsblatt: Handelsblatt Ausgabe vom 10.01.2005.- Journal Mittelstand, Düsseldorf 2005
- ISO 14040 : 1997 ISO 14040 Environmental Management – Life Cycle Assessment – Principles and Framework, 1997
- ISO 14041 : 1998 ISO 14041 Environmental Management – Life Cycle Assessment – Goal and Scope Definition and Inventory Analysis
- ISO 14042 : 2000 ISO 14042 Environmental Management – Life Cycle Assessment – Life Cycle Impact Assessment, 2000
- ISO 14043 : 2000 ISO 14043 Environmental Management – Life Cycle Assessment – Life Cycle Interpretation, 2000
- KERSTEN 2007 H.J. Kersten: Transportwege von REA-Gips in Deutschland, telefonische Auskunft, Stuttgart, 2007
- KREISSIG 1999 J. Kreißig und J. Kümmel (1999): Baustoff-Ökobilanzen. Wirkungsabschätzung und Auswertung in der Steine-Erden-Industrie. Hrsg. Bundesverband Baustoffe Steine + Erden e.V.
- RENTZ 2002 O. Rentz: Erarbeitung der Grundlagen für das BVT-Merkblatt Großfeuerungsanlagen im Rahmen des Informationsaustausches nach Art. 16(2) IVU-Richtlinie, Deutsch-Französisches Institut für Umweltforschung, Karlsruhe, 2002
- WEIß 2007 C. Weiß: Preisverhältnis zwischen Flusssäure und synthetischem Anhydrit, telefonische Kommunikation, Fluorchemie Gruppe, Bergheim Erft, 2007



---

WIRSCHING 2005

F. Wirsching: Calcium sulfate, Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, Wiley-VCH Verlag, Weinheim, 2005



## Anhang A Sachbilanzdaten

		Dihydrat (Naturgips)	β- Halbhydrat	α- Halbhydrat	Anhydrit Mix
<b>Input</b>					
<b>Ressourcen</b>					
<b>Energetische Ressourcen</b>	MJ	<b>110</b>	<b>1621</b>	<b>3577</b>	<b>1813</b>
Braunkohle	MJ	4,7	82	135	124
Erdgas	MJ	4,3	890	1438	785
Erdöl	MJ	17	296	1371	415
Steinkohle	MJ	4,2	222	399	264
Uran	MJ	7,2	130	216	195
Primärenergie aus Wasserkraft	MJ	37	0,4	8,7	15
Primärenergie aus Windkraft	MJ	33	0,5	7,9	13
Primärenergie aus Sonnennutzung	MJ	3,1	0,0	0,7	1,2
<b>Stoffliche Ressourcen</b>					
Anhydrit (Stein)	kg	0,0	0,0	0,0	333
Flußspat	kg	0,0	0,0	0,0	37
Gips (Naturgips)	kg	1000	525	0,0	0,0
Taubes Gestein	kg	6,4	131	222	193
Luft	kg	6,8	598	1306	525
<b>Wasser</b>					
Wasser (undefiniert)	kg	0,0	73	137	28
Grundwasser	kg	3,3	67	112	102
Oberflächenwasser	kg	9,2	300	536	519
Trinkwasser	kg	0,0	0,0	242	0,0



<b>Output</b>					
<b>Produkt</b>	t	1	1	1	1
<b>Abfälle</b>					
Abraum	kg	6,3	131	220	199
Siedlungsabfälle	kg	1,5E-06	8,0E-07	0,0E+00	3,9E-01
Hausmüllähnlicher Gewerbemüll	kg	1,3E-08	7,0E-09	0,0E+00	3,9E-01
Sondemüll	kg	3,6E-04	2,9E-03	3,0E-03	1,4E-02
<b>Emissionen in Luft</b>					
<b>Anorganische Emissionen</b>					
Ammoniak	kg	4,2E-04	7,4E-04	1,3E-03	9,8E-04
Barium	kg	1,3E-06	9,6E-05	2,0E-04	9,6E-05
Beryllium	kg	7,5E-10	2,4E-08	4,3E-08	1,2E-07
Kohlendioxid	kg	2,38	100,98	230,22	92,33
Kohlenmonoxid	kg	9,5E-03	2,1E-02	3,9E-02	3,2E-02
Staub (Summenwert)	kg	1,2E-03	5,7E-03	1,1E-02	3,2E-01
Stickoxide	kg	1,8E-02	9,7E-02	2,0E-01	1,3E-01
Lachgas	kg	6,2E-04	2,5E-03	4,7E-03	2,9E-03
Schwefeldioxid	kg	3,2E-03	6,6E-02	1,5E-01	3,6E-01
Schwefelwasserstoff	kg	3,7E-06	1,2E-04	2,6E-04	1,4E-04
Chlorwasserstoff	kg	1,2E-05	3,1E-04	5,8E-04	8,1E-04
Fluorwasserstoff	kg	2,5E-06	6,8E-05	1,2E-04	4,9E-04
Wasserdampf	kg	3,28	379,21	832,15	276,80
<b>Organische Emissionen</b>					
NM VOC (unspezifisch)	kg	1,6E-03	3,8E-03	9,5E-03	5,7E-03
Methan	kg	3,6E-03	2,3E-01	4,7E-01	2,4E-01
PAK (polyzyk. aromat. KW)	kg	8,4E-07	1,4E-05	6,4E-05	7,4E-05
Alkane (unspezifisch)	kg	3,3E-06	2,5E-04	9,3E-04	1,8E-04
Benzol	kg	8,3E-07	1,2E-04	2,3E-04	1,3E-04
Butan	kg	3,0E-05	1,9E-03	4,7E-03	1,9E-03
Dioxin (unspezifisch)	kg	7,7E-16	6,5E-14	1,4E-13	6,1E-14
Ethan	kg	8,8E-05	6,7E-03	1,5E-02	6,5E-03



Formaldehyd	kg	2,1E-06	4,1E-04	1,0E-03	3,0E-04
Pentan	kg	1,4E-05	1,3E-03	2,6E-03	1,3E-03
Phenol (Hydroxybenzol)	kg	2,1E-12	2,6E-11	4,6E-11	3,9E-11
Polychlorierte Biphenyle (PCB unspezifisch)	kg	1,8E-11	1,5E-09	3,0E-09	1,4E-09
Propan	kg	1,4E-04	5,7E-03	1,7E-02	6,1E-03
R 11 (Trichlorfluormethan)	kg	9,5E-08	1,7E-06	2,8E-06	2,5E-06
R 114 (Dichlortetrafluorethan)	kg	9,7E-08	1,7E-06	2,9E-06	2,6E-06
R 12 (Dichlordifluormethan)	kg	2,0E-08	3,7E-07	6,1E-07	5,5E-07
R 13 (Chlortrifluormethan)	kg	1,3E-08	2,3E-07	3,8E-07	3,4E-07
R 22 (Chlordifluormethan)	kg	2,2E-08	4,0E-07	6,6E-07	6,0E-07
Xylol	kg	9,7E-06	3,8E-04	6,8E-04	6,3E-04
<b>Schwermetalle</b>					
Arsen	kg	3,8E-08	1,4E-06	2,6E-06	3,4E-06
Blei	kg	1,3E-07	4,1E-06	7,8E-06	7,9E-06
Cadmium	kg	4,0E-09	1,4E-07	2,8E-07	2,0E-07
Chrom (Cr <sup>III+</sup> )	kg	3,8E-11	2,6E-09	5,3E-09	2,5E-09
Chrom (unspezifisch)	kg	2,2E-08	5,5E-07	1,2E-06	3,0E-06
Kobalt	kg	1,2E-08	2,6E-07	7,7E-07	1,3E-06
Mangan	kg	1,0E-07	2,8E-06	4,8E-06	3,9E-06
Nickel	kg	7,9E-08	1,4E-06	4,7E-06	3,6E-05
Quecksilber	kg	2,2E-08	6,7E-07	1,2E-06	1,2E-06
Selen	kg	1,2E-07	4,5E-06	8,1E-06	8,8E-06
Vanadium	kg	5,7E-07	9,0E-06	3,8E-05	1,6E-04
<b>Emissionen in Frischwasser</b>					
<b>Summenparameter</b>					
CSB	kg	3,3E-04	1,3E-02	2,4E-02	2,3E-02
BSB	kg	3,2E-06	1,8E-04	4,0E-04	2,2E-04
<b>Anorganische Emissionen</b>	kg				
Ammoniak	kg	3,7E-09	1,1E-07	2,1E-07	1,4E-07
Ammonium/Ammoniak	kg	2,2E-04	3,7E-04	5,7E-04	5,5E-04
Barium	kg	5,9E-07	1,1E-05	4,9E-05	1,5E-05
Beryllium	kg	3,3E-10	6,0E-09	9,9E-09	9,0E-09
Chlorid	kg	9,2E-03	2,9E-01	6,8E-01	3,6E-01
Fluorid	kg	1,4E-03	3,9E-02	7,4E-02	4,6E-02





Nitrat	kg	1,7E-04	1,4E-03	2,5E-03	1,7E-03
Phosphat	kg	4,9E-07	5,8E-06	2,0E-05	2,8E-05
Stickstoff org. gebunden	kg	2,9E-06	4,1E-05	1,8E-04	2,3E-04
Sulfat	kg	3,2E-03	6,7E-02	1,2E-01	9,7E-02
<b>Organische Emissionen</b>					
PAK (polyzyk. aromat. KW)	kg	5,6E-08	1,1E-06	2,0E-06	1,6E-06
Benzofluoranthren	kg	9,1E-12	1,8E-10	8,2E-10	2,2E-10
Benzol	kg	2,0E-07	4,8E-06	1,9E-05	5,9E-06
Phenol	kg	2,3E-07	4,1E-06	1,9E-05	5,7E-06
Naphthalin	kg	6,2E-09	1,2E-07	5,4E-07	1,6E-07
<b>Schwermetalle</b>					
Arsen	kg	1,6E-07	4,0E-06	1,3E-05	4,7E-06
Blei	kg	2,9E-07	6,9E-06	1,3E-05	9,2E-06
Cadmium	kg	8,9E-08	2,1E-06	6,3E-06	2,6E-06
Chrom (Cr <sup>III+</sup> )	kg	2,7E-08	4,9E-07	8,1E-07	7,3E-07
Kupfer	kg	2,3E-07	1,2E-05	2,9E-05	1,2E-05
Molybdän	kg	2,8E-07	5,3E-06	9,2E-06	8,0E-06
Nickel	kg	1,1E-07	4,9E-06	1,1E-05	5,3E-06
Quecksilber	kg	3,5E-09	1,3E-07	2,7E-07	1,5E-07
Selen	kg	5,2E-08	9,7E-07	1,9E-06	1,7E-06
Vanadium	kg	8,8E-08	1,6E-06	2,9E-06	2,7E-06
Zink	kg	1,2E-07	4,8E-06	9,5E-06	5,6E-06
<b>Emissionen in Salzwasser</b>					
<b>Anorganische Emissionen</b>					
Barium	kg	2,5E-06	4,4E-05	2,0E-04	6,4E-05
Beryllium	kg	3,9E-09	6,9E-08	3,1E-07	9,0E-08
<b>Schwermetalle</b>					
Kobalt	kg	6,9E-08	1,2E-06	5,4E-06	1,6E-06
Vanadium	kg	4,7E-08	8,3E-07	3,7E-06	1,1E-06
<b>Emissionen in Boden</b>					
<b>Anorganischer Emissionen</b>					
Ammoniak	kg	3,6E-05	2,0E-03	4,9E-03	2,0E-03
Phosphor	kg	3,7E-06	2,0E-04	5,0E-04	2,0E-04



<b>Schwermetalle</b>					
Blei	kg	1,9E-11	1,1E-09	2,6E-09	1,1E-09
Cadmium	kg	2,6E-10	1,4E-08	3,5E-08	1,4E-08
Chrom (Cr <sup>III+</sup> )	kg	7,0E-08	3,8E-06	9,5E-06	3,8E-06
Kobalt	kg	1,2E-09	6,8E-08	1,7E-07	6,8E-08
Nickel	kg	2,2E-08	1,1E-06	2,8E-06	1,1E-06
Quecksilber	kg	1,4E-12	7,7E-11	1,9E-10	7,8E-11
Zink	kg	7,8E-09	4,3E-07	1,1E-06	4,3E-07



## Anhang B Beschreibung der Auswertegrößen

### Anhang B 1 Primärenergieverbrauch

Der Primärenergiebedarf kann durch unterschiedliche Arten an Energiequellen gedeckt werden. Der Primärenergiebedarf ist das Quantum an direkt aus der Hydrosphäre, Atmosphäre oder Geosphäre entnommenen Energie oder Energieträger, die noch keiner anthropogenen Umwandlung unterworfen wurde. Bei fossilen Energieträgern und Uran ist dies z.B. die Menge entnommener Ressource ausgedrückt in Energieäquivalent (Energieinhalt der Energierohstoffe). Bei nachwachsenden Energieträgern wird z.B. die energetisch charakterisierte Menge eingesetzter Biomasse beschrieben. Bei Wasserkraft handelt es sich um die Energiemenge, die aus der Änderung der potentiellen Energie (aus der Höhendifferenz) des Wassers gewonnen wird. Als aggregierte Werte werden folgende Primärenergien ausgewiesen:

Der Summenwert „**Primärenergieverbrauch nicht erneuerbar**“ angegeben in MJ charakterisiert im Wesentlichen den Einsatz der Energieträger Erdgas, Erdöl, Braunkohle, Steinkohle und Uran. Erdgas und Erdöl werden sowohl zur Energieerzeugung, als auch stofflich als Bestandteil z.B. von Kunststoffen eingesetzt. Kohle wird im Wesentlichen zur Energieerzeugung genutzt. Uran wird ausschließlich zur Stromgewinnung in Kernkraftwerken eingesetzt.

Der Summenwert „**Primärenergieverbrauch erneuerbar**“ angegeben in MJ wird in der Regel separat ausgewiesen und umfasst Wind- und Wasserkraft, Solarenergie und Biomasse.

Es ist in jedem Fall wichtig, dass genutzte Endenergie (z.B. 1 kWh Strom) und eingesetzte Primärenergie nicht miteinander verrechnet wird, da sonst der Wirkungsgrad zur Herstellung bzw. Bereitstellung der Endenergie nicht berücksichtigt wird.

Der Energieinhalt der hergestellten Produkte wird als stoffgebundener Energieinhalt ausgewiesen. Er wird durch den unteren Heizwert des Produkts charakterisiert. Es stellt den noch nutzbaren Energieinhalt dar.

### Anhang B 2 Abfallgrößen

Abfall fällt in unterschiedlichen Qualitäten an. Abfälle sind nach §1 Abs. 1S. 1 AbfG „bewegliche Sachen, deren sich der Besitzer entledigen will“ oder „deren geordnete Entsorgung zur Wahrung des Wohl der Allgemeinheit, insbesondere des Schutzes der Umwelt, geboten ist“.

Aus Sicht der Bilanzierung ist eine Unterteilung der Abfälle in drei Kategorien sinnvoll. Es werden die Kategorien Abraum / Haldengüter, hausmüllähnliche Gewerbeabfälle und Sonderabfälle ausgewiesen.

**Abraum / Haldengüter** in kg: Diese Kategorie setzt sich aus abzuräumenden Deckschichten bei der Rohstoffgewinnung, Aschen und sonstigen, zu beseitigenden, rohstoffgewinnungsbedingten Materialien zusammen. Auch fallen Erzaufbereitungsrückstände wie Taubes Gestein, Schlacken, Rotschlämme u.ä. darunter.

**Hausmüllähnlicher Gewerbeabfall** in kg: Diese Größe enthält die aggregierten Werte von hausmüllähnlichem Gewerbeabfälle nach 3. AbfVwV TA SiedlABf.

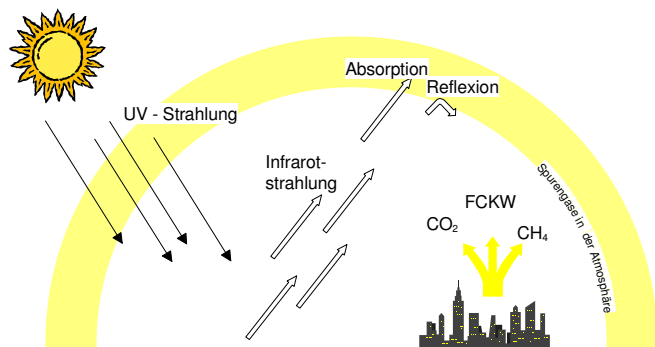
**Sonderabfälle** in kg: Aggregiert sind in dieser Kategorie Stoffe, die einer Sondermüllverbrennung oder Sondermülldeponie zugeführt werden, wie Lackschlämme, Galvanikschlämme, Filterstäube oder sonstigem festen oder flüssigen Sondermüll und radioaktive Abfälle aus dem Betrieb von Kernkraftwerken und der Brennelementherstellung.

### Anhang B 3 Treibhauseffekt (GWP)

Der Wirkungsmechanismus des Treibhauseffektes kann im kleineren Maßstab, wie der Name schon sagt, in Gewächs- oder Treibhäusern beobachtet werden. Dieser Effekt findet auch im globalen Maßstab statt. Die eintreffende kurzwellige Sonnenstrahlung trifft auf die Erdoberfläche und wird dort teilweise absorbiert (was zu einer direkten Erwärmung führt) und teilweise als Infrarotstrahlung reflektiert. Der reflektierte Anteil wird in der Troposphäre durch sogenannte Treibhausgase absorbiert und richtungsunabhängig wieder abgestrahlt, so dass es teilweise wieder zur Erde zurückgestrahlt wird. Dies führt zu einer weiteren Erwärmung.

Zusätzlich zum natürlichen Treibhauseffekt ist aufgrund menschlicher Aktivitäten ein anthropogener Anteil am Treibhauseffekt zu verzeichnen. Zu den anthropogen freigesetzten Treibhausgasen gehören beispielsweise Kohlendioxid, Methan und FCKW's. Abbildung A 1 zeigt die wesentlichen Vorgänge des anthropogenen Treibhauseffekts. Die Bewertung des Treibhauseffekts sollte die mögliche langfristige globale Auswirkung berücksichtigen.

Das Treibhauspotential wird in Kohlendioxid - Äquivalent ( $\text{CO}_2\text{-Äq.}$ ) angegeben. Dies bedeutet, dass alle Emissionen bezüglich ihres potentiellen Treibhauseffekts zu  $\text{CO}_2$  ins Verhältnis gesetzt werden. Da die Verweildauer der Gase in der Atmosphäre in die Berechnung mit einfließen, muss der für die Abschätzung betrachtete Zeithorizont immer mit angegeben werden. Üblich ist ein Bezug auf 100 Jahre.



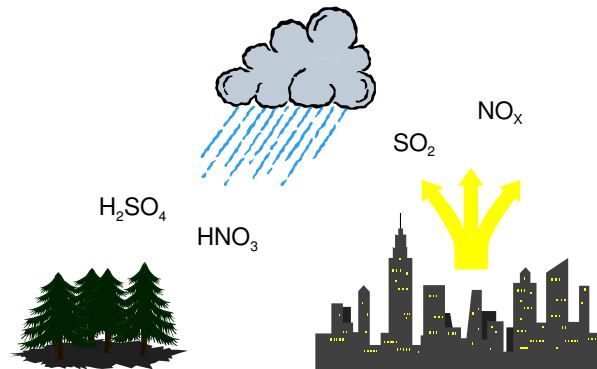
**Abbildung A 1: Anthropogener Treibhauseffekt (KREISSIG 1999)**

### Anhang B 4 Versauerungspotenzial (AP)

Die Versauerung von Böden und Gewässern entsteht überwiegend durch die Umwandlung von Luftschadstoffen in Säuren. Daraus resultiert eine Verringerung des pH-Werts von Regenwasser und Nebel von 5,6 auf 4 und darunter. Relevante Beiträge hierzu liefern Schwefeldioxid und Stickoxide mit ihren Säuren ( $\text{H}_2\text{SO}_4$  und  $\text{HNO}_3$ ). Schäden entstehen an Ökosystemen, wobei an erster Stelle das Waldsterben zu nennen ist. Dabei kann es zu einer direkten Schädigung oder indirekten Schädigung (Nährstoffauswaschung aus

den Böden, verstärkte Löslichkeit von Metallen im Boden) kommen. Aber auch bei Bauwerken und Baustoffen nehmen die Schäden zu. Beispiele hierzu sind Metalle und Natursteine, die verstärkter Korrosion oder Zersetzung ausgesetzt sind. Abbildung A 2 stellt den wesentlichen Wirkungspfad der Versauerung dar.

Das Versauerungspotential wird in Schwefeldioxid – Äquivalent ( $\text{SO}_2$ -Äq.) angegeben. Es wird die Fähigkeit bestimmter Stoffe,  $\text{H}^+$ -Ionen zu bilden und abzugeben, als Versauerungspotential bezeichnet. Bestimmten Emissionen kann ein Versauerungspotential zugewiesen werden, indem die vorhandenen S-, N- und Halogenatome zur Molmasse der Emission ins Verhältnis gesetzt werden. Bezugssubstanz ist Schwefeldioxid.



**Abbildung A 2: Versauerung (KREISSIG 1999)**

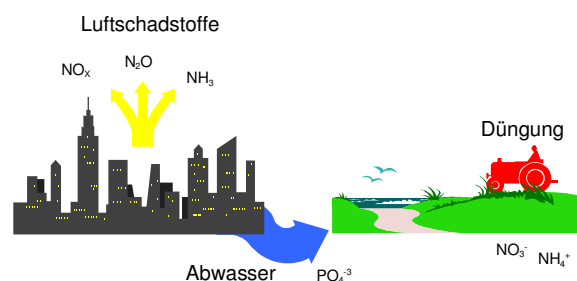
Bei der Bewertung der Versauerung ist zu berücksichtigen, dass es sich zwar um ein globales Problem handelt, die Effekte regional jedoch unterschiedlich ausfallen können.

### Anhang B 5 Eutrophierungspotential (EP)

Unter Eutrophierung bzw. Nährstoffeintrag versteht man eine Anreicherung von Nährstoffen an einem bestimmten Standort. Man unterscheidet dabei zwischen aquatischem und terrestrischem Nährstoffeintrag. Beiträge zur Eutrophierung stammen aus Luftschadstoffen, Abwässern und der Düngung in der Landwirtschaft.

Die Folgen für Gewässer sind ein verstärktes Algenwachstum. Dadurch dringt weniger Sonnenlicht in tiefere Schichten vor. Dies führt zu einer verringerten Photosynthese verbunden mit einer niedrigen Sauerstoffproduktion. Auch wird für den Abbau abgestorbener Algen Sauerstoff benötigt. Beide Effekte bewirken eine verringerte Sauerstoffkonzentration im Wasser, was letztendlich zu Fischsterben und einer anaeroben Zersetzung (ohne Sauerstoff) führen kann. Es entsteht dabei unter anderem Schwefelwasserstoff und Methan. Man spricht auch von einem „Umkippen des Gewässers“. Quellen der Eutrophierung sind in Abbildung A 3 dargestellt.

Auf eutrophierten Böden kann man bei Pflanzen eine verstärkte Anfälligkeit gegenüber Krankheiten und Schädlingen sowie eine Schwächung des Festigkeitsgewebes beobachten. Ein zu hoher Nährstoffeintrag führt durch Auswaschungsprozesse zu einem erhöhten Nitratgehalt im Grundwasser. Das Nitrat gelangt so auch ins Trinkwasser.



**Abbildung A 3: Quellen der Eutrophierung (KREISSIG 1999)**

Nitrat zumindest in geringen Mengen ist toxikologisch unbedenklich. Problematisch ist jedoch Nitrit als Reaktionsprodukt von Nitrat, welches beim Menschen toxisch wirkt.

Das Eutrophierungspotential geht als Phosphat – Äquivalent ( $\text{PO}_4\text{-Äq.}$ ) in die Bilanz ein. Wie beim Versauerungspotential ist auch beim Eutrophierungspotential zu berücksichtigen, dass die Effekte regional sehr unterschiedlich sind.

### Anhang B 6 Photooxidantienbildung (POCP)

Im Gegensatz zur Schutzfunktion in der Stratosphäre ist bodennahes Ozon als schädliches Spurengas einzuordnen. Photochemische Ozonbildung in der Troposphäre, auch als Sommersmog bezeichnet, steht im Verdacht, zu Vegetations- und Materialschäden zu führen. Höhere Konzentrationen von Ozon sind humantoxisch. Unter Einwirkung von Sonnenstrahlung entstehen aus Stickoxid und Kohlenwasserstoffemissionen unter komplexen chemischen Reaktionen aggressive Reaktionsprodukte, wobei das wichtigste Reaktionsprodukt Ozon ist. Stickoxide allein bewirken keine hohe Ozonkonzentration.

Kohlenwasserstoffemissionen treten bei unvollständiger Verbrennung, beim Umgang mit Ottokraftstoffen (Lagerung, Umschlag, Tanken etc.) oder beim Umgang mit Lösungsmitteln auf. Hohe Ozonkonzentrationen treten bei hohen Temperaturen, geringer Luftfeuchtigkeit, geringem Luftaustausch sowie hohen Kohlenwasserstoffkonzentrationen auf. Da das Vorhandensein von CO (meist vom Verkehr) das gebildete Ozon zu  $\text{CO}_2$  und  $\text{O}_2$  reduziert, kommt es in unmittelbarer Nähe der Emissionsquellen oft nicht zu den höchsten Ozonkonzentrationen. Diese treten eher in Reinluftgebieten (z.B. Wäldern) auf, in welchen kaum CO vorhanden ist (Abbildung A 4).

Das Photooxidantienpotential (POCP) wird in der Ökobilanz als Ethen-Äquivalent ( $\text{C}_2\text{H}_4\text{-Äq.}$ ) angegeben. Bei einer Bewertung muss berücksichtigt werden, dass die tatsächlichen Ozonkonzentrationen von der Witterung abhängen. Ebenso muss der lokale Charakter der Ozonbildung integriert werden.

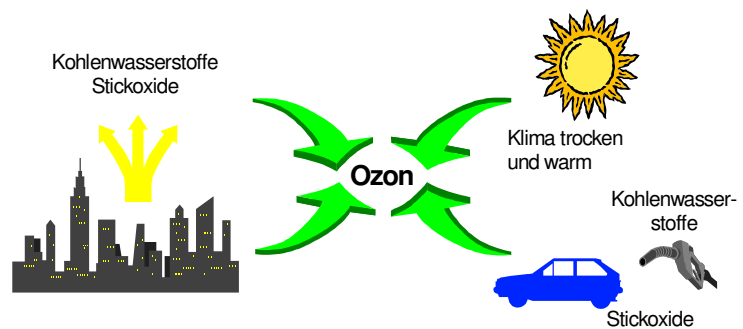


Abbildung A 4: Bodennahe Ozonbildung (Sommersmog) (KREISSIG 1999)

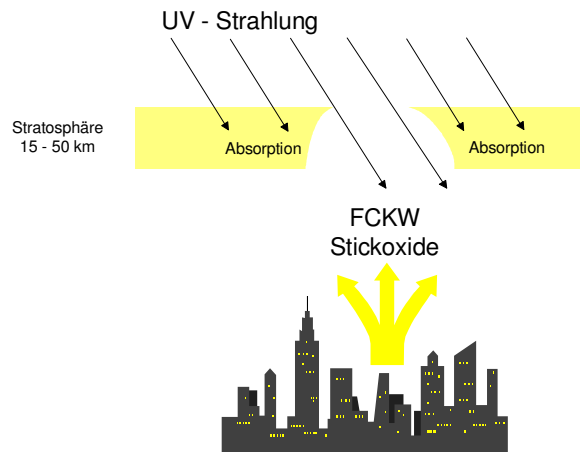
### Anhang B 7 Ozonabbaupotenzial (ODP)

Ozon entsteht in großen Höhen durch die Bestrahlung von Sauerstoff-Molekülen mit kurzwelligem UV-Licht. Dies führt zur Bildung der sogenannten Ozonschicht in der Stratosphäre (15 - 50 km Höhe). Rund 10 % des Ozons gelangt durch Vermischungsvorgänge in die Troposphäre. Trotz seiner geringen Konzentration ist die Wirkung des Ozons wichtig für das Leben auf der Erde. Ozon absorbiert die kurzwellige UV-Strahlung und gibt diese richtungsunabhängig mit größerer Wellenlänge wieder ab. Nur ein Teil der UV-

Strahlung gelangt auf die Erde. Durch anthropogene Emissionen kommt es zum Abbau der Ozonschicht. Allgemein bekannt wurde dies durch Berichte über das Ozonloch. Beschränkte sich dies dabei auf die Gebiete der Antarktis, so ist jetzt auch, wenn auch nicht im selben Ausmaß, ein Ozonabbau über den mittleren Breiten (z.B. Europa) erkennbar.

Eine ozonabbauende Wirkung wird im Wesentlichen zwei Stoffgruppen zugeschrieben. Dies sind die Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKWs) und die Stickoxide ( $\text{NO}_x$ ). Abbildung A 5 zeigt die wesentlichen Aspekte des Ozonabbaus.

Ein Effekt des Ozonabbaus ist die Erwärmung der Erdoberfläche. Zu berücksichtigen ist insbesondere aber auch die Empfindlichkeit von Mensch, Tier und Pflanzen gegenüber UV-B und UV-A Strahlung. Denkbare Auswirkungen sind z.B. Wuchsveränderungen bzw. Minderung der Ernteerträge (Störung der Photosynthese), Tumorindikationen (Hautkrebs und Augenerkrankungen) und die Abnahme des Meeresplankton, was erhebliche Auswirkungen auf die Nahrungskette nach sich ziehen würde.



**Abbildung A 5: Ozonabbau (KREISSIG 1999)**

Im Rahmen des klassischen Konzeptes zur Berechnung des Ozonabbaupotentials werden vor allem anthropogen emittierte Halogenkohlenwasserstoffe, die als Katalysatormolekül viele Ozonmoleküle zerstören können, erfasst. Aus den Ergebnissen von Modellrechnungen für unterschiedliche ozonrelevante Stoffe ergeben sich sogenannte „Ozon-schädigende Potentiale“ (ODP: Ozone Depletion Potential). Dabei wird zunächst ein Szenario mit fester Emissionsmenge eines Referenz-FCKW (R11) durchgerechnet. Als Ergebnis erhält man im Gleichgewicht einen bestimmten Wert der Gesamtozonreduktion. Für jede Substanz, für die ein Ozonabbaupotential errechnet werden soll, wird das gleiche Szenario betrachtet, wobei R11 durch die gleiche Menge der Substanz ersetzt wird. Als Ergebnis erhält man das Ozonabbaupotential für die jeweilige Substanz, das in R11-Äquivalenten angegeben wird.

Eine Bewertung des Ozonabbaupotentials sollte die langfristigen, globalen und zum Teil irreversiblen Auswirkungen berücksichtigen.