



Programmgruppe Systemforschung
und Technologische Entwicklung

***Statistische Fehlerabschätzung
in Sachbilanzen***

Ralf Klöckner

Statistische Fehlerabschätzung in Sachbilanzen

Ralf Klöckner

Berichte des Forschungszentrums Jülich ; 3657

ISSN 0944-2952

Programmgruppe Systemforschung und Technologische Entwicklung Jül-3657
D83 (Diss. Technische Universität Berlin)

Zu beziehen durch: Forschungszentrum Jülich GmbH · Zentralbibliothek
D-52425 Jülich · Bundesrepublik Deutschland

☎ 02461/61-6102 · Telefax: 02461/61-6103 · e-mail: zb-publikation@fz-juelich.de

Statistische Fehlerabschätzung in Sachbilanzen

Innerhalb der Ökobilanz findet die Frage nach der Qualität der zugrundeliegenden Daten zwar zunehmend Beachtung, doch bislang keine ausreichende Berücksichtigung. Für das Kernstück einer Ökobilanz, die Sachbilanz, wird in der vorliegenden Arbeit eine Methode bereitgestellt, indem die Datenqualität in Analogie zur Meßwertbehandlung in der Physik abgeschätzt wird. Die zugrundeliegenden Gesetze von Fehlerrechnung und Statistik werden für die Anwendung in der Sachbilanzierung adaptiert.

Die Methodik wird durch Anwendung im Rahmen einer Fallstudie, dem Vergleich zwischen Pkw-Rohkarosserien in konventioneller Stahlbauweise beziehungsweise Stahl- und Aluminium-Leichtbaukonstruktionen, demonstriert und erprobt. Die Daten und Berechnungen basieren auf einer umfangreichen Literaturstudie.

Mittels der statistischen Fehlerabschätzungen lassen sich innerhalb der Fallstudie die Datenstreuungen hinreichend differenziert behandeln, um Signifikanzen zu identifizieren. Die Vielzahl der statistischen Streuungen lassen sich auf diese Weise behandeln und erlauben eine konzentrierte Diskussion der systematischen Unsicherheiten durch Parametervariationen. Auf diese Weise lassen sich signifikante Effekte herausarbeiten und die entscheidenden Randbedingungen pointiert aufzeigen.

Die anhand der Fallstudie erarbeiteten Resultate zeigen auf, daß die Standardabweichung des Mittelwertes ein geeignetes statistisches Maß für die Anwendung innerhalb einer nicht herstellerspezifischen Sachbilanz darstellt. In Verbindung mit der Analyse verschiedener Szenarien, die den systematischen Fehlerquellen Rechnung tragen, läßt sich in geeigneter Weise die Aussagekraft einer Sachbilanz bestimmen.

Statistical error estimation in Life Cycle Inventories

The influence of data quality on the results of a Life Cycle Assessment is discussed increasingly. In this thesis a method is shown to deal with the problem of data quality within Life Cycle Inventory in analogy to statistical error estimation in physics.

This method is demonstrated and tested in a case study comparing bodies-in-white of passenger cars as conventional steel construction, light weighted steel construction and aluminium construction.

Within the case study statistical error estimation treats data inaccuracy in a sufficient detailed way and it therefore allows to recognise significant differences. The numerous statistical data inaccuracies can be handled this way and the influence of systematic errors can be discussed by variation of parameters. Significant effects and relevant requirements can be shown pointedly.

The results of the case study show that the standard deviation of the average value represents a suitable measure of statistical data spreads within a not site specific Life Cycle Inventory. Combined with the analysis of different scenarios, regarding the systematic errors, the reliability of a study can be estimated.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Ökobilanzen	5
2.1	Struktur einer produktbezogenen Ökobilanz	5
2.1.1	Zieldefinition	5
2.1.2	Sachbilanz	6
2.1.3	Wirkungsabschätzung	7
2.1.4	Interpretation	8
2.2	Berechnungsalgorithmen der Sachbilanzierung	10
2.2.1	Die sequentielle Methode	10
2.2.2	Die Matrix-Methode	11
2.2.3	Petri-Netze	13
2.3	Datenqualität in Sachbilanzen	16
2.3.1	Das Konzept der Datenqualitätsindikatoren	16
2.3.2	Sensitivitätsanalyse in der Matrix-Methode	18
2.3.3	Intervallarithmetik	20
2.3.4	Monte Carlo-Modell	22
3	Statistische Fehlerabschätzung	25
3.1	Statistik und Fehlerrechnung	26
3.2	Adaption für Sachbilanzen	33
3.2.1	Fehlerfortpflanzung	37
3.2.2	Prozeßspezifische Mittelwerte	39
3.2.3	Einbezug von Teilprozeßketten	41
3.2.4	Kovarianzen	44
3.2.5	Thermischer Energieeinsatz	48
3.2.6	Zusammenfassung der Vorgehensweise	50
4	Fallstudie	52
4.1	Zieldefinition	53
4.2	Sachbilanz	56
4.2.1	Herstellung der Stahlrohkarosserie	56
4.2.2	Herstellung der Aluminiumrohkarosserie	63

4.2.3	Nutzungsphase	69
4.2.4	Entsorgung und Recycling	78
4.2.5	Energiebereitstellung	83
4.2.6	Transporte	100
5	Auswertung	104
5.1	Herstellung und Entsorgung	112
5.2	Gesamter Lebensweg	122
5.3	Einfluß von Fahrzeugklasse und Antriebsart	127
5.4	Kovarianzen	133
6	Zusammenfassung	136
	<u>Anhang</u>	138
A	Fahrzeugklassen	138
B	Demonstration der Methode	140
C	Einzelprozesse	146
C.1	Stahlrohkarosserie	148
C.2	Aluminiumkarosserie	176
D	Energiebereitstellung	196
D.1	Feuerungen	196
D.2	Elektrische Energie	199
E	Bilanz von Herstellung und Entsorgung	205
	Symbole und Abkürzungen	252
	Literaturverzeichnis	254

Kapitel 1

Einleitung

Ökologische Aspekte treten heute neben den ökonomischen zunehmend bei der Beurteilung von Produkten, Dienstleistungen und Techniken in den Vordergrund. Zentrale Bedeutung bei der Erfassung und Gegenüberstellung unterschiedlicher Umweltbelastungen kommt dabei der Ökobilanz zu.

Ökobilanzen zu einem vollständigen und praktikablen Instrument für ganzheitliche ökologische Betrachtungen zu formen, ist Gegenstand intensiver Forschungsanstrengungen. Die Umweltauswirkungen unterschiedlicher Prozesse sind sehr komplex und durch ihre verschiedenen Ausprägungen schwer zu vergleichen. Forschungsbedarf wird daher derzeit häufig im Bereich der Wirkungsabschätzung und der Bewertung bezüglich der Umweltbeeinträchtigungen gesehen (siehe beispielsweise [1]). Erste Schwierigkeiten entstehen aber schon in der Erstellung der Sachbilanz, in der die mit den Untersuchungsgegenständen über den gesamten Lebensweg verknüpften Stoff- und Energieströme wertfrei erfaßt werden. Sie gilt zwar in ihrer Entwicklung als weit fortgeschritten, und es liegt für die Erstellung von Sachbilanzen der Entwurf einer Norm seitens der International Standard Organisation (ISO) vor,¹ die in absehbarer Zeit ihre entgeltliche Fassung finden und einen Rahmen zur Erstellung von Sachbilanzen bilden wird [2]. Dennoch bestehen eine Reihe grundsätzlicher Probleme, die für eine korrekte Beurteilung des Sachverhaltes gelöst werden müssen.

Das Auftreten von Kuppelprodukten führt beispielsweise zu Schwierigkeiten bei der Zuordnung von Stoff- und Energieströmen. Weiterhin wird die Aussage einer Ökobilanz stark von der Qualität der Daten beeinflusst. Je repräsentativer und genauer die zugrundeliegenden Daten die tatsächlichen Verhältnisse beschreiben, um so aussagekräftiger sind die Ergebnisse der Untersuchung. Von entscheidender Bedeutung ist somit offenbar die Frage, wie sich diese Datenungenauigkeiten auf die Aussagekraft der Sachbilanzergebnisse übertragen.

In der vorliegenden Arbeit wird eine solche Methode bereitgestellt, indem die Datenqualität in Analogie zur Meßwertbehandlung in der Physik abgeschätzt wird. Die zugrundeliegenden Gesetze von Fehlerrechnung und Statistik werden für die Anwendung in der

¹ISO-Norm 14041

Sachbilanzierung adaptiert. Interpretation der Vorgehensweise und deren Leistungsfähigkeit, ein Maß für die Aussagekraft von Sachbilanzergebnissen zu liefern, werden aufgezeigt.

Die Methodik wird durch Anwendung im Rahmen einer Fallstudie, dem Vergleich zwischen Pkw-Rohkarosserien aus Stahl beziehungsweise Aluminium, demonstriert und auch erprobt. Ein geeignetes Maß für die Aussagekraft muß einerseits sicherstellen, daß die Streuung der Ergebnisse nicht unterschätzt wird, um Fehlschlüsse zu vermeiden. Andererseits müssen die Ursachen der Streuungen differenziert genug behandelt werden können, um ein Streumaß praktikabler Größe zu erzeugen, welches signifikante Unterschiede noch erkennen läßt. Die erforderlichen Daten wurden daher aus der Literatur mit großer Sorgfalt recherchiert, um die Berechnungen so realitätsnah wie möglich zu gestalten. Die anhand der Fallstudie erarbeiteten Resultate sollen so aufzeigen, ob im Rahmen dieser Methodik Signifikanzen im Vergleich der Sachbilanzwerte darstellbar sind.

Kapitel 2

Ökobilanzen

In diesem Kapitel wird mit einer kurzen Charakterisierung des Instruments Ökobilanz der Hintergrund der vorliegenden Arbeit verdeutlicht. Einen Schwerpunkt bildet dabei die Sachbilanz, deren methodische Ergänzung Gegenstand dieser Arbeit ist. Die Wahl der Berechnungsmethode bei der Sachbilanzierung beeinflusst die Vorgehensweise bei Erfassung und Verarbeitung der Datenstreuungen. Daher werden sowohl die verschiedenen Algorithmen zur Berechnung von Sachbilanzen erläutert als auch ein Überblick über bereits bestehende Konzepte zur Abschätzung der Datenqualität gegeben.

Eine Ökobilanz läßt sich nach [3] definieren als möglichst umfassender Vergleich der Umweltauswirkungen zweier oder mehrerer unterschiedlicher Produkte, Produktgruppen, Systeme, Verfahren oder Verhaltensweisen. Im folgenden wird nun der häufige Fall einer produktbezogenen Ökobilanz diskutiert. Die Aussagen lassen sich jedoch in der Regel problemlos verallgemeinern.

2.1 Struktur einer produktbezogenen Ökobilanz

Die Struktur einer Ökobilanz nach der ISO-Norm 14040 zeigt Abbildung 2.1 [4]. Die einzelnen Schritte werden dabei nicht streng seriell nacheinander abgearbeitet, sondern beeinflussen sich gegenseitig. So kann sich beispielsweise bei der Erstellung der Sachbilanz ergeben, daß die in der Zieldefinition festgelegten Bilanzgrenzen modifiziert werden müssen. Im folgenden werden nun die einzelnen Module nach Abbildung 2.1 kurz erläutert und ihre wichtigsten Inhalte vorgestellt.

2.1.1 Zieldefinition

Im Schritt Zieldefinition werden zunächst die Bilanzobjekte, also beispielsweise die zu vergleichenden Produkte, definiert. Daraufhin wird der Zweck der Bilanzierung, bzw. das Erkenntnisinteresse formuliert. In einem weiteren wichtigen Schritt wird die funktionelle Einheit festgelegt. Dabei handelt es sich nach [5] um den Nutzwert der Produkte oder

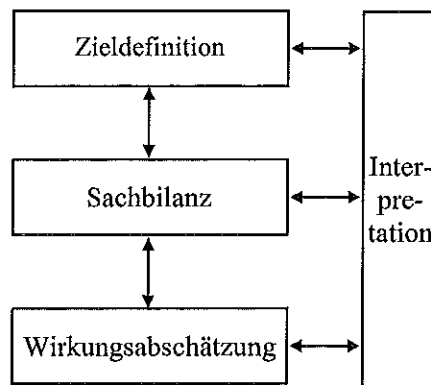


Abbildung 2.1: Aufbau einer Ökobilanz nach ISO-Norm 14040 [4].

die spezifische Dienstleistung, auf die alle Bilanzaussagen bezogen werden.¹ Darauf aufbauend lassen sich nun sowohl sinnvolle geographische und zeitliche Abgrenzungen des Bilanzraumes als auch Abschneidekriterien, ab wann ein Stoffstrom nicht weiter verfolgt werden soll, festlegen und die Auswahl der zu betrachtenden Prozesse treffen.

2.1.2 Sachbilanz

Zur Erstellung der Sachbilanz wird zunächst der Lebensweg der Bilanzobjekte von der Rohstoffförderung bis zur Entsorgung in einzelne Schritte zerlegt. Diese Einzelschritte lassen sich als kleinste mit stofflichen und energetischen Eingangs- und Ausgangsgrößen sinnvoll beschreibbare Einheiten festlegen. Im Fall von produktbezogenen Sachbilanzen sind alle diese Schritte in der Regel mit Einzelprozessen identisch. Sind alle diese Prozesse identifiziert und zu Prozeßketten zusammengesetzt, beginnt mit der Datenerhebung der wohl aufwendigste Teil der Bilanzierung. Alle stofflichen und energetischen Ein- und Ausgänge der Einzelprozesse müssen bestimmt werden.

Durch Vernetzung der Einzelprozesse zu einer Prozeßkette, entstehen Stoff- und Energieflüsse, die sich grundsätzlich in zwei Gruppen einteilen lassen. Die internen Flüsse entstehen und enden innerhalb des Bilanzraums, die externen Flüsse hingegen überschreiten die Bilanzgrenzen. Idealerweise sollten externe Flüsse nur aus Emissionen in die Umwelt und aus der Umwelt direkt entnommenen Rohstoffen bestehen. In der Realität erweist es sich, allein angesichts der hochgradigen Vernetztheit innerhalb der Volkswirtschaften, als nicht durchführbar, jeden Materialbedarf bis zu den Rohstoffen zurückzuverfolgen. Kleine Stoffflüsse werden daher häufig an den Bilanzgrenzen abgeschnitten und vorgelagerte Prozesse vernachlässigt. Datenmangel liefert einen häufigen Grunde für solch unerwünschte externe Flüsse.

Der Sachbilanz liegt das Modell eines abgeschlossenen Systems zugrunde, in dem Sinne, daß alle Auswirkungen auf die Umwelt eindeutig dem betrachteten Produkt zugeordnet werden können. Diese Modellvorstellung kann nun, wie oben erwähnt, schwach, sie kann

¹ Als typisches Beispiel läßt sich das tausendfache Abtrocknen von Händen beim Vergleich von Papier- mit Textilhandtüchern anführen.

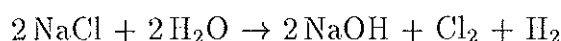
aber auch stark verletzt sein. Letzteres ist der Fall, wenn Kuppelprodukte oder *nicht originäres Recycling* auftreten.

Kuppelprodukte sind Produkte, die innerhalb des Bilanzraumes entstehen, aber in Prozesse eingehen, die außerhalb des Bilanzraumes liegen. Unter nichtoriginärem Recycling wird der Anfall von Sekundärrohstoffen verstanden, die nicht innerhalb des Bilanzraumes zur Substitution des korrespondierenden Primärrohstoffe eingesetzt werden. In diesen Fällen stellt sich die Frage, welcher Anteil der verursachten Stoff- und Energieströme diesen externen Strömen anzulasten ist. Solch anteilige Zuordnungen werden als Allokationen bezeichnet.

Ist die Antwort des externen Systems auf Veränderungen der externen Ströme bekannt, kann in der Regel nach dem Substitutionsverfahren vorgegangen werden. Würde beispielsweise bei Wegfall des Kuppelproduktes selbiges im externen System durch Alternativprozesse hergestellt, so können dem Hauptprodukt diese durch das Kuppelprodukt eingesparten Stoff- und Energieströme gutgeschrieben werden. Diese Methode setzt allerdings voraus, daß sowohl das Verhalten des externen Systems mit hinreichender Sicherheit vorhergesagt werden kann, als auch die mit dem Alternativprozeß verknüpften Stoff- und Energieströme bekannt sind.

Diese Schwierigkeiten vermeidet das sogenannte Cut-off-Verfahren, das alle Ströme ausschließlich dem Hauptprodukt zuordnet. Dies hat den Vorteil großer Einfachheit und maximaler Transparenz.

Weitere Möglichkeiten bestehen in der Allokation nach physikalischen Größen, wie dem Verhältnis von Masse, Molzahlen, Reaktionsenthalpien oder nach ökonomischen Größen wie dem Marktwert. Die Auswahl des geeignetsten Allokationskriteriums bereitet insbesondere dann Schwierigkeiten, wenn den entstehenden Produkten stark unterschiedliche Nutzarten zugewiesen werden können, wie zum Beispiel bei stofflicher Verwendung des einen und energetischer Verwendung des anderen Produktes. In [6] werden für die Chlor-Alkali-Elektrolyse, bei der aus Steinsalz und Wasser Natronlauge, Chlorgas und Wasserstoff durch die Reaktion



entstehen, 21 verschiedene Allokationsmöglichkeiten durchgerechnet. Der Energieaufwand, der dem Wasserstoff zugeordnet wird, schwankt infolgedessen um zwei Größenordnungen und nach Ausschluß zweier besonders abweichender Allokationen noch immer um den Faktor 18.

2.1.3 Wirkungsabschätzung

Nach [7] läßt sich im allgemeinen kein direkter Zusammenhang zwischen konkreten Auswirkungen auf die Umwelt und den Stoff- und Energieströmen einer Ökobilanz herstellen. So ist es beispielsweise kaum möglich, aus den bilanzierten SO_2 -Emissionen die Versauerung eines Sees und etwaige Folgen wie Fischsterben vorherzusagen. Es ist lediglich möglich, Wirkungspotentiale aufzuzeigen. Dabei gilt allgemein, daß die Aussagekraft um

so größer ist, je weniger die Auswirkungen von Entstehungsort und -konzentration der Emissionen abhängen bzw. vom Abbauort der Rohstoffe, da diese Informationen in der Ökobilanz keinen Niederschlag finden.

Die „Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC)“² publizierte 1993 eine Vorgabe zur Erstellung von Wirkungsabschätzungen [7]. Demzufolge besteht die Wirkungsabschätzung aus drei Teilen, der Klassifizierung, der Charakterisierung und der Bewertung.

Bei der *Klassifizierung* werden die zu erwartenden Umweltwirkungen der externen Flüsse der Sachbilanz identifiziert. Die dabei nach derzeitigem Kenntnisstand zu berücksichtigenden Wirkungskategorien werden im folgenden noch vorgestellt.

In der *Charakterisierung* werden die Beiträge der einzelnen Sachbilanzdaten zu den Umweltkategorien quantifiziert. Dazu müssen Maßeinheiten für die jeweiligen Kategorien festgelegt werden, wie zum Beispiel das CO₂-Äquivalent für die Kategorie Treibhauseffekt.

Die *Bewertung* soll deutlich getrennt von den beiden anderen Schritten erfolgen, da hier in starkem Maße subjektive Aspekte einfließen. Die betrachteten Umweltkategorien werden verglichen und eine Gewichtung oder Reihung wird vorgenommen. Dieser Schritt ist im Bereich der methodischen Diskussion wohl der umstrittenste. Er sollte daher möglichst transparent und nachvollziehbar erfolgen.

Eine Liste der im Idealfall zu berücksichtigenden Wirkungskategorien wurde sowohl in [1] im Auftrag des Umweltbundesamtes erstellt, als auch von der SETAC [8]. Die beiden Listen stimmen dabei bezüglich der in Tabelle 2.1 dokumentierten Wirkungskategorien weitgehend überein. In [7] werden von der SETAC vier übergeordnete Schlüsselkategorien Ressourcenverzehr, Menschliche Gesundheit, Intaktheit des Ökosystems sowie Sozialverträglichkeit, formuliert. Die Kategorien in Tabelle 2.1 lassen sich unter die ersten drei dieser Hauptkategorien einordnen, wie in der Tabelle vermerkt ist.

Unter die Kategorie 1 fällt dabei nach [1] sowohl der Verbrauch endlicher, als auch erneuerbarer Ressourcen, da das Nutzungspotential erneuerbarer Quellen ebenfalls beschränkt ist. Eine weitergehende Diskussion der einzelnen Wirkungskategorien findet sich in [1].

Die in Tabelle 2.1 aufgestellte Liste wird in der Regel von Ökobilanzen nicht vollständig abzuleisten sein. Die Liste stellt vielmehr einen Maximalkatalog dar, aus dem für jede Wirkungsabschätzung eine sinnvolle Auswahl zu treffen ist. Ein solcher Maximalkatalog ist durch den jeweiligen Kenntnisstand von umweltschädlichen Effekten begrenzt.

2.1.4 Interpretation

Der Interpretationsschritt bildet nach [9] den Abschluß der Ökobilanz. In diesem Schritt sollen die Bilanzdaten im üblichen wissenschaftlichen Sinne interpretiert werden. Die Bilanz soll unter Rückbezug auf die Zieldefinition auf ihre Konsistenz untersucht und es

²Die Gesellschaft wurde 1979 gegründet und verfügt über etwa 5000 Mitglieder (Stand 1997). Vertreten sind die westliche Großindustrie, Forschungsinstitute, Behörden und in geringem Umfange Verbraucherverbände und Umweltschutzorganisationen. Ziel der SETAC ist es, ein internationaler und interdisziplinärer Mittler zu sein bei der Erarbeitung eines Standards zur Erstellung und Bewertung von Ökobilanzen [7].

Tabelle 2.1: Im Idealfall in einer Ökobilanz zu berücksichtigende Wirkungskategorien nach UBA [1]. Die SETAC teilt in vier Schlüsselkategorien ein [7]: R: Ressourcenverzehr (Resource Depletion), Ö: Intaktheit des Ökosystems (Ecological Health), M: Menschliche Gesundheit (Human Health) sowie Sozialverträglichkeit (Social Welfare).

Kategorie Nr. nach UBA	Kategoriebereich nach SETAC	Bezeichnung
1	R, Ö	Inanspruchnahme von Ressourcen
2	Ö	Treibhauseffekt
3	Ö, M	Ozonabbau (Stratosphäre)
4	M	Humantoxizität
5	Ö	Ökotoxizität
6	Ö	Versauerung der Gewässer und Böden
7	Ö	Eutrophierung der Gewässer
8	M, Ö	Bildung von Photooxidantien
9	R, Ö	Flächenbedarf
10	M	Belästigungen (Lärm, Geruch)
11	M	Gesundheitsgefährdung am Arbeitsplatz („Arbeitsschutz“)
12	Ö	Abwärme und Strahlung
13	Ö, M	Abfall
14	Ö, R	Beeinträchtigung der Natur- schönheit und der Artenvielfalt (Naturschutz)

sollen Datenlücken aufgezeigt werden. Es sollen die wesentlichen Umweltauswirkungen und ihre Ursachen benannt werden. Die Beiträge der einzelnen Prozeßabschnitte sollen ebenso wie Schlußfolgerungen und Zusammenhänge aufgezeigt werden. Inwieweit die abschließende Beurteilung der Bilanzergebnisse noch Bestandteil der Ökobilanz ist, ist nach [9] noch umstritten.

2.2 Berechnungsalgorithmen der Sachbilanzierung

Um Informationen über die Qualität von Einzeldaten in der Sachbilanzierung bis zu den Ergebnissen zu transportieren, stehen verschiedene Methoden zur Verfügung. Diese Methoden werden in Abschnitt 2.3 und Kapitel 3 diskutiert. Welches Verfahren zum Einsatz kommen kann, hängt auch vom zugrundeliegenden Berechnungsalgorithmus der Sachbilanz ab. Diese Berechnungsverfahren sollen nun im folgenden kurz vorgestellt und diskutiert werden. Bei der Erstellung von Sachbilanzen kommen drei prinzipiell verschiedene Verfahren zum Einsatz: sequentielles Vorgehen, Matrixverfahren und Petri-Netze.

2.2.1 Die sequentielle Methode

Das sequentielle Vorgehen lehnt sich stark an die Struktur der Prozeßkette an. Ausgehend von der funktionellen Einheit wird die gesamte Prozeßkette sukzessive berechnet. Das Prinzip dieser Methode läßt sich dabei grob in vier Schritte gliedern.

Im ersten Schritt werden für jeden Prozeß der Prozeßkette die stofflichen und energetischen Einträge und Austräge bezogen auf eine Basiseinheit bestimmt. Die Basiseinheit orientiert sich am Hauptprodukt des Prozesses. In der Regel wird eine Masseneinheit oder eine Energieeinheit des Energieäquivalentes des Hauptprodukts zugrundegelegt. Das Energieäquivalent läßt sich bei elektrischem Strom durch die elektrische Energie, bei brennbarem Energieträger durch den Heizwert³, bei stofflichen Wärmeträgern durch die Enthalpie zuordnen.

In einem zweiten Schritt wird die Gewichtung bestimmt, mit der die Einzelprozesse in die Prozeßkette eingehen. Ausgehend von dem die funktionelle Einheit liefernden Prozeß werden Stoff- und Energiebedarf entlang der internen Ströme zu vorgelagerten Prozessen fortgepflanzt, bis die Bilanzgrenze erreicht wird. Analog wird gegebenenfalls mit nachgelagerten Prozessen verfahren. Das Gewicht ergibt sich dabei aus dem Gesamtbedarf des Hauptprodukts innerhalb der Prozeßkette, ausgedrückt in der jeweiligen Basiseinheit. Durch selbstreferierende Prozesse kann dabei die Notwendigkeit von Iterationen entstehen [12, 13]. Dies ist der Fall, wenn Produkte aus einer Prozeßkette innerhalb einer anderen Prozeßkette wiederum ein Produkt liefern, welches innerhalb der ersten Prozeßkette als Eingangsstoff benötigt wird. Die Länge der Prozeßkette wächst nun theoretisch auf unendlich an. Die Berechnungen müssen mittels eines zu definierenden, genauigkeitsabhängigen Abbruchkriteriums Λ beendet werden:

$$\frac{\Delta x}{x} < \Lambda, \quad (2.1)$$

x : iterativ zu berechnende Größe,
 Δx : Änderung von x in einem Iterationsschritt.

³Hier findet sowohl der untere Heizwert, wie z.B. in [10], als auch der obere, wie beispielsweise in [11], Anwendung.

Steht ein Maß δ_x für die Streuung der Größe x zur Verfügung, so ergibt sich eine natürliche Abbruchbedingung der Form

$$\frac{\Delta x}{x} \ll \frac{\delta_x}{x}.$$

Eine genauere Aussage erfordert genauere Kenntnisse über die Beschaffenheit des Streumaßes δ_x .

In einem dritten Schritt werden alle stofflichen und energetischen Eingangs- und Ausgangsgrößen der Einzelprozesse für den Gesamtbedarf des Hauptproduktes berechnet. Im anschließenden vierten Schritt werden die so bestimmten Beiträge der Einzelprozesse addiert.

Abweichungen von dieser Vorgehensweise bei ihrer Realisierung in Form von Algorithmen für Computerprogramme sind sicherlich möglich, doch der dargestellte Grundgedanke behält seine Gültigkeit.

Die Vorteile der sequentiellen Methode liegen in seinem naheliegenden und anschaulichen Ansatz. Die daraus resultierende Benutzerfreundlichkeit stellt angesichts der komplexen Prozeßketten einen nicht zu unterschätzenden Vorteil dar.

Nachteilig wirken sich hingegen die gegebenenfalls auftretenden Iterationen aus. Die benötigte Rechenzeit verlängert sich in unbestimmter Weise [13], und man ist gezwungen, ein Abbruchkriterium gemäß Gleichung (2.1) festzulegen. Da im allgemeinen kein Streuungsmaß zur Verfügung steht, muß der Parameter Λ willkürlich eingeführt werden.

2.2.2 Die Matrix-Methode

Ein mathematisch sehr elegantes Berechnungsverfahren von Sachbilanzen stellt die Matrix-Methode dar. In [13] wird ein anschauliches Vorgehen erläutert, das den folgenden Ausführungen als Grundlage dient.

Die Eingangs- und Ausgangsgrößen in der Prozeßkette werden in interne und externe Güter unterteilt. Die internen Güter koppeln nur an interne Ströme, werden also gemäß Abschnitt 2.1.2 innerhalb der Bilanzgrenzen erzeugt und verbraucht. Die externen Güter koppeln an solche externen Ströme, die unmittelbar mit der Umwelt in Wechselwirkung treten. Es handelt sich also etwa um Rohstoffentnahmen, Flächenverbrauch oder Emissionen. Kuppelprodukte, die den Bilanzraum verlassen, werden durch geeignete Allokationen berücksichtigt. Die Ein- und Austräge eines Prozesses können dann als Vektor dargestellt werden:

$$\begin{pmatrix} \vec{a} \\ \vec{b} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_r \\ b_1 \\ \vdots \\ b_s \end{pmatrix}$$

a_i : interne Güter,

b_i : externe Güter.

Umfaßt die Prozeßkette q Einzelprozesse, so lassen sich Matrizen A , B konstruieren:

$$\begin{pmatrix} A \\ B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1q} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{r1} & \cdots & a_{rq} \\ b_{11} & \cdots & b_{1q} \\ \vdots & & \vdots \\ b_{s1} & \cdots & b_{sq} \end{pmatrix}.$$

Formal wird nun ein *Kernprozeß* $\vec{\alpha}$ eingeführt, dessen einziger Ausgang an internen Gütern direkt durch die funktionelle Einheit bestimmt ist. Die Ein- und Austräge in die Umwelt $\vec{\beta}$ sind unbekannt und gerade die gesuchten Größen.

$$\begin{pmatrix} \vec{\alpha} \\ \vec{\beta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \vdots \\ \alpha_r \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_s \end{pmatrix}$$

Treten keine Kuppelprodukte auf, verschwinden alle α_i bis auf eines. Da alle internen Ströme innerhalb des Bilanzraumes beginnen und enden und da Energie- und Massenerhaltung erfüllt sein müssen, gilt:

$$\sum_{j=1}^q a_{ij} p_j = \alpha_i \quad (2.2)$$

$$\Leftrightarrow A\vec{p} = \vec{\alpha}, \quad (2.3)$$

p_j : Beitrag des Prozesses j .

Dies stellt ein System von linearen Gleichungen dar, welches lösbar ist, wenn A eine quadratische Matrix mit linear unabhängigen Spalten und Zeilen ist. A ist nur dann quadratisch, wenn die Anzahl der internen Ströme r identisch mit der Anzahl der Prozesse q ist. Setzt man voraus, daß alle Prozesse nur ein Produkt bereitstellen, so ist diese Bedingung offensichtlich erfüllt. Kuppelprodukte treten jedoch recht häufig auf. Die geeignete Anzahl der Prozesse läßt sich dann beispielsweise durch Einführung von Teilprozessen sicherstellen, die jeweils nur das Hauptprodukt oder eines der Kuppelprodukte bereitstellen. Die mit dem Prozeß verknüpften internen und externen Ströme werden durch geeignete Allokationen (siehe dazu auch Abschnitt 2.1.2) auf die Teilprozesse aufgeteilt. Lineare Abhängigkeiten entstehen durch Einbezug redundanter Prozesse [13]. Durch Elimination dieser Prozesse kann dieses Problem beseitigt werden.

Ist sichergestellt worden, daß A quadratisch und nicht singular ist, läßt sich A invertieren, und man erhält aus Gleichung (2.3)

$$\vec{p} = A^{-1}\vec{\alpha}.$$

Der Vektor $\vec{p}$ enthält die jeweiligen Beiträge der einzelnen Prozesse. Dem entspricht in der sequentiellen Methode das Gewicht der Einzelprozesse, welches im zweiten Schritt bestimmt wird, wie in Abschnitt 2.2.1 erläutert.

Da die Prozesse zu den internen wie zu den externen Strömen mit gleichem Gewicht beitragen, ergibt sich der gesuchte Vektor $\vec{\beta}$ der externen Ströme mit der Umwelt aus

$$\vec{\beta} = B \vec{p} = B A^{-1} \vec{\alpha}, \quad (2.4)$$

wobei die Matrix B nicht quadratisch sein muß.

Die Matrixgleichung (2.3) läßt sich natürlich auch mit anderen Verfahren lösen. [13] schlägt eine Lösung nach der Cramerschen Regel vor, aber auch das Gaußsche Eliminationsverfahren stellt eine naheliegende und praktizierte Möglichkeit dar. Die Voraussetzungen für die Lösbarkeit bleiben gleich.

Aus Gleichung (2.4) läßt sich unmittelbar ablesen, daß die $s \times q$ Matrix $B A^{-1}$ die kumulierten externen Ströme der Einzelprozesse enthält. Bei der hier gewählten Spaltenkonvention lassen sich für jeden Prozeß spaltenweise der Rohstoffbedarf und die Emissionen in die Umwelt ablesen.

Einen kompletten Überblick über den Beitrag der einzelnen Prozesse zu internen und externen Strömen gibt die Matrix

$$P := \begin{pmatrix} a_{11}p_1 & \cdots & a_{1q}p_q & \alpha_1 \\ \vdots & & \vdots & \vdots \\ a_{r1}p_1 & \cdots & a_{rq}p_q & \alpha_r \\ b_{11}p_1 & \cdots & b_{1q}p_q & \beta_1 \\ \vdots & & \vdots & \vdots \\ b_{s1}p_1 & \cdots & b_{sq}p_q & \beta_s \end{pmatrix}.$$

Wie bei der Matrix $B A^{-1}$ können spaltenweise die jeweiligen Beiträge der einzelnen Prozesse abgelesen werden. Im Unterschied zur Matrix $B A^{-1}$ werden nun aber auch die Beiträge zu den internen Strömen bereitgestellt.

2.2.3 Petri-Netze

Petri-Netze wurden 1962 von dem Mathematiker C. A. Petri eingeführt, um das Verhalten komplex strukturierter Systeme beschreiben zu können.

Petri-Netze werden aus drei Elementen konstruiert. Sie bestehen aus Stellen, Transitionen und Verbindungen [14]. Die übliche graphische Notation dieser Elemente zeigt Abbildung 2.2. Die Stellen lassen sich dabei im allgemeinen anschaulich als Lager, die Transitionen als Prozesse interpretieren. Die Verbindungen geben die Richtung des Stoff- bzw. Energieflusses an. Verbindungen dürfen nur zwischen Stellen und Transitionen, nicht aber zwischen zwei Stellen oder zwei Transitionen geknüpft werden. Dies führt dazu, daß im Netz auch Stellen eingeführt werden müssen, wo in der Realität keine Lager existieren. Die oben gegebene anschauliche Deutung muß soweit relativiert werden.

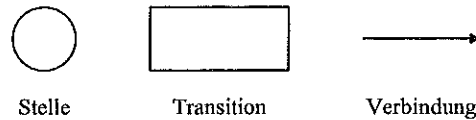


Abbildung 2.2: Graphische Notation der drei Elemente von Petri-Netzen.

Aus den drei Grundelementen wird die Prozeßkette konstruiert. Die Transitionen bilden mit den unmittelbar umgebenden Verbindungen und Stellen Knoten. Das so geknüpfte Netz wird nun sukzessive Knoten für Knoten gerechnet, ausgehend von der funktionellen Einheit. Dabei werden die Daten $\vec{x}_j$ aus den Eingangsstellen entnommen und über die mit der jeweiligen Transition verknüpften Funktion $\vec{y}_i = f_i(\vec{x}_1, \dots, \vec{x}_n)$ in die Ausgangsstellen abgebildet [14]. Ein anschauliches Beispiel zeigt dazu Abbildung 2.3. Die der Transition „Kochen“ zugeordnete Funktion beschreibt, wieviel Abendessen und Plastikmüll aus den Eingangsgrößen Spaghetti, Gorgonzola und Sahne entstehen. Übertragen auf die Berechnung einer Prozeßkette entspricht dem Abendessen das Hauptprodukt des Prozesses und den Spaghetti ein Roh- oder Werkstoffbedarf. Die Funktionen $f_i(\vec{x}_1, \dots, \vec{x}_n)$ können dabei im Prinzip beliebig sein. Für alle Knoten, bei denen die Rechenrichtung für eine Teilmenge der Ausgangsgrößen $\{\vec{y}'_i\} \subseteq \{\vec{y}_i\}$ entgegen den Verbindungen läuft, müssen sie jedoch eindeutig umkehrbar sein [15]. Für jede Funktion

$$\vec{y}'_i = f_i(\vec{x}_1, \dots, \vec{x}_n)$$

existiert also eine Funktion g_i , so daß

$$\vec{x}_j = g_i(\vec{y}'_i) \quad \forall \vec{x}_j.$$

Will man die funktionelle Einheit, auf die sich das Netz beziehen soll, frei wählen, so müssen, bis auf Entsorgungsprozesse, im allgemeinen alle Knoten diese Bedingung erfüllen. Ähnlich wie bei der sequentiellen Methode kann bei komplexen Netzstrukturen mit selbst-referierenden Prozessen auch bei Petri-Netzen der Fall auftreten, daß die Berechnung nicht

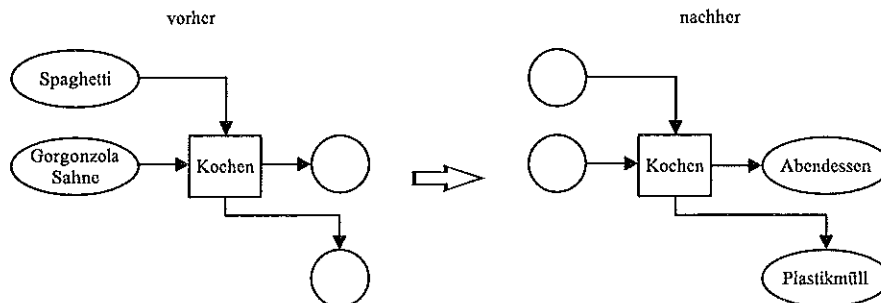


Abbildung 2.3: Beispiel zur Berechnung eines Petri-Knotens: Spaghetti, Gorgonzola und Sahne werden den Inputstellen entnommen, das Abendessen und der Plastikmüll an den Outputstellen abgelegt [18].

mehr geschlossen lösbar ist. Dann muß auf Iterationsverfahren zurückgegriffen werden [15]. Petri-Netze sind sehr flexibel. So kann nach [14] der Detaillierungsgrad der Prozeßkette auch im nachhinein vergleichsweise einfach vergrößert oder verkleinert werden. Gleiches gilt für die Erweiterung des Netzes. Sensitivitätsanalysen im Sinne einer in Abschnitt 2.3.2 beschriebenen Marginalanalyse ist nach [15] derzeit nicht möglich.

Vorteile der Petri-Netze:

- Hohe Benutzerfreundlichkeit
Komplexe Netze lassen sich bequem mit Hilfe der graphischen Notation konstruieren.
- Hohe Flexibilität
Das geknüpfte Netz läßt sich auch im nachhinein vergrößern, verfeinern oder ergänzen.
- Wählbare funktionale Zusammenhänge
Den Transitionen können beliebige umkehrbare Funktionen zugewiesen werden.

Nachteile der Petri-Netze:

- Iterationen erforderlich
Es gibt verschachtelte Rekursionen, die mit Petri-Netzen nicht mehr geschlossen lösbar sind.
- Hoher Rechenaufwand
Der Rechenaufwand übersteigt den des Matrixverfahrens deutlich [15].
- Keine Sensitivitätsanalyse
Marginalanalysen oder ähnliches sind derzeit noch nicht möglich.

2.3 Datenqualität in Sachbilanzen

In diesem Kapitel wird zunächst ein Überblick über den Stand der Forschung zur Behandlung von Datenqualitäten in Sachbilanzen gegeben. In Abschnitt 3.1 werden die mathematischen Werkzeuge vorgestellt, die der in dieser Arbeit bereitgestellten Methode zugrundeliegen. Die Anwendbarkeit dieser Werkzeuge wird in Abschnitt 3.2 diskutiert und die Interpretation der statistischen Größen in der Sachbilanzierung erarbeitet. Die Instrumente der Statistik und Fehlerrechnung werden angepaßt und ergänzt und so eine Methode für Fehlerabschätzungen in Sachbilanzen entwickelt.

Die im folgenden erläuterten Methoden lassen sich durch die Quantifizierbarkeit der Qualitätsmerkmale der Daten klassifizieren. Während der Ansatz der SETAC, Datenqualitätsindikatoren einzuführen, die Erfassung nicht quantifizierbarer Eigenschaften der Daten explizit einschließt, beschränken sich die anderen Konzepte auf die Verarbeitung quantifizierbarer Datencharakteristika.

Dies trifft auch auf das in [16] vorgeschlagene Rechnen mit unscharfen Intervallen per Fuzzy Logic. Nach [17] wird diese Methode derzeit in Fallstudien erprobt. Bei Abfassung der Arbeit lagen keine detaillierten Veröffentlichungen vor, die eine angemessene Diskussion dieser Vorgehensweise ermöglichen würden.

2.3.1 Das Konzept der Datenqualitätsindikatoren

Die Thematik der Erfassung und Behandlung von Datenqualitäten wurde erstmals 1992 im Rahmen eines Workshops der SETAC aufgegriffen [19].

Die Erfassung erfolgt dabei durch Angabe von Datenqualitätsindikatoren. Eine Beispielliste nach [19] zeigt Tabelle 2.2.

Die Auswahl geeigneter Datenqualitätsindikatoren muß dabei für jede Sach- oder Ökobilanz entsprechend der Zieldefinition vorgenommen werden. Um die erreichte Qualität der Daten im weiteren Verlauf beurteilen zu können, müssen Datenqualitätsziele festge-

Tabelle 2.2: Beispiele für Datenqualitätsindikatoren nach [19].

Datenqualitätsindikatoren	
quantitativ	qualitativ
Genauigkeit	Konsistenz
Vollständigkeit	Eignung/Anwendbarkeit
Verteilung	Vergleichbarkeit
Homogenität	Repräsentanz
Korrelationen	Anomalien
Unsicherheit	Reproduzierbarkeit
	Verfügbarkeit

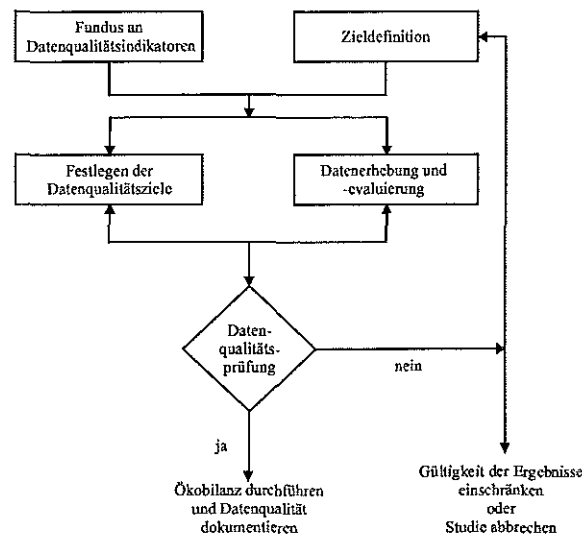


Abbildung 2.4: Flußdiagramm zur Sicherung der Datenqualität nach [19].

legt werden. In einer Datenqualitätsprüfung (Data Quality Assessment) wird dann durch Vergleich der tatsächlich erreichten Datenqualität mit den Zielindikatoren festgestellt, ob die erhobenen Werte den Ansprüchen genügen. Ist dies der Fall, so kann die Bilanzierung mit dem erhobenen Datensatz durchgeführt werden. Die Datenqualität ist dann in Form der jeweiligen Datenqualitätsindikatoren und Ziele zu dokumentieren.

Werden die Datenqualitätsziele jedoch verfehlt, so muß entweder die Zieldefinition der Tragfähigkeit der Daten angepaßt werden oder die Gültigkeit der Bilanzaussagen eingegrenzt werden. Im schlimmsten Fall völliger Unvereinbarkeit von erzielter und benötigter Datenqualität muß auf Durchführung der Studie verzichtet werden. Abbildung 2.4 verdeutlicht den Ablauf in Form eines Flußdiagrammes.

Zum Einsatz kam dieses Konzept in [11]. Tabelle 2.3 zeigt die dort gewählten Datenqualitätsindikatoren, die parallel zur Datenerhebung erfragt wurden.

In [11] werden Sachbilanzen⁴ für die Herstellung einer ganzen Reihe von Materialien bereitgestellt, die als Grundlage anderer Bilanzen Verwendung finden können und sollen.

Tabelle 2.3: Datenqualitätsindikatoren, die in [11] verwendet wurden.

Datenherkunft	Datenentstehung	Datentyp
B Betrieb	I gemessen	e Einzelwert
L Literatur	II berechnet	m Mittelwert mehrerer Einzelwerte
x weitere	III geschätzt	x andere

⁴Die Autoren sprechen von Inventaren, angelehnt an den englischen Begriff für Sachbilanz „Life Cycle Inventory“.

Aus Vertraulichkeitsgründen gegenüber den Daten liefernden Firmen bzw. Institutionen werden allerdings nur komplette Sachbilanzen ohne Auflösung nach Einzelprozessen bereitgestellt. Zu diesen kompletten Inventaren können nun keine Datenqualitätsindikatoren angegeben werden, da „es nicht möglich ist, die Datenqualitätsindikatoren der einzelnen Umweltparameter der Module zu einem übergeordneten Indikator zu integrieren“ ([11], S. 39).

Damit ist ein schwerwiegender Schwachpunkt dieser Vorgehensweise herausgestellt. Es bestehen keine direkten Zusammenhänge zwischen den Datenqualitätsindikatoren und den Ergebnissen der Studie oder der Sachbilanz. Ein Konzept zur Fortpflanzung der Qualitätsindikatoren der Einzelprozeßdaten durch die Prozeßkette wird nicht bereitgestellt.

2.3.2 Sensitivitätsanalyse in der Matrix-Methode

Die durch [13] bereitgestellten Werkzeuge der Sensitivitätsanalyse bauen auf einer Berechnung der Sachbilanz nach der Matrix-Methode auf. Die Methode wurde in Abschnitt 2.2.2 beschrieben.

Werden mit den Elementen der Matrix A Bedarf und Verbrauch an internen Gütern⁵ variiert (Δa_{ij}), so ergibt sich für die Änderung der Umweltlasten $\Delta \beta_k$ in erster Ordnung [13]:

$$\Delta \beta_k(\Delta a_{ij}) = \frac{\partial \beta_k}{\partial a_{ij}} \Delta a_{ij}. \quad (2.5)$$

Analoge Näherungen werden für den Zusammenhang zwischen den Variationen von Bereitstellung und Bedarf der externen Güter Δb_{ij} sowie den Bedarf an internen Gütern des Kernprozesses $\Delta \alpha_i$ und ihren Auswirkungen auf die Umwelt gemacht:

$$\Delta \beta_k(\Delta b_{ij}) = \frac{\partial \beta_k}{\partial b_{ij}} \Delta b_{ij}, \quad (2.6)$$

$$\Delta \beta_k(\Delta \alpha_i) = \frac{\partial \beta_k}{\partial \alpha_i} \Delta \alpha_i. \quad (2.7)$$

Betrachtet man die relativen Änderungen

$$a'_{ij} := \frac{\Delta a_{ij}}{a_{ij}},$$

$$b'_{ij} := \frac{\Delta b_{ij}}{b_{ij}},$$

$$\alpha'_i := \frac{\Delta \alpha_i}{\alpha_i},$$

$$\beta'_i := \frac{\Delta \beta_i}{\beta_i},$$

⁵Dabei kann es sich beispielsweise um ein Halbzeug handeln.

so lassen sich geschlossene Lösungen für die Größen

$$\frac{\beta'_k}{a'_{ij}}, \frac{\beta'_k}{b'_{ij}}, \frac{\beta'_k}{\alpha'_i}, \frac{\beta'_k}{\beta'_i}$$

angeben. Sie lassen sich analytisch aus den bei der Bilanzierung bestimmten Matrizen und Vektoren berechnen. Die Größe β'_k/β'_i wird formal aus Symmetriegründen eingeführt mit

$$\frac{\beta'_k}{\beta'_i} = \begin{cases} 1 & \text{für } i = k \\ 0 & \text{sonst.} \end{cases}$$

Aus diesen berechenbaren Größen läßt sich eine $(r + s) \times (q + 1)$ -Matrix der Gestalt

$$D_k = \begin{pmatrix} \frac{\beta'_k}{a'_{11}} & \dots & \frac{\beta'_k}{a'_{1q}} & \frac{\beta'_k}{\alpha'_1} \\ \vdots & & \vdots & \vdots \\ \frac{\beta'_k}{a'_{r1}} & \dots & \frac{\beta'_k}{a'_{rq}} & \frac{\beta'_k}{\alpha'_r} \\ \frac{\beta'_k}{b'_{11}} & \dots & \frac{\beta'_k}{b'_{1s}} & \frac{\beta'_k}{\beta'_1} \\ \vdots & & \vdots & \vdots \\ \frac{\beta'_k}{b'_{s1}} & \dots & \frac{\beta'_k}{b'_{sq}} & \frac{\beta'_k}{\beta'_s} \end{pmatrix}$$

konstruieren. Aus dieser Matrix läßt sich nun übersichtlich ablesen, wie die Umweltlast β_k auf einzelne relative Änderungen der Prozeßkettenparameter a_{ij} , b_{ij} , α_i reagiert. Wird beispielsweise das Matrixelement $(D_k)_{ij}$ mit $i \leq r$ und $j \leq q$ betrachtet, so läßt sich daraus ablesen, daß eine Variation des Bedarfs beziehungsweise der Produktion des internen Gutes i im Prozeß j um $x\%$ eine Änderung der betrachteten Umweltlast β_k um $(x \cdot (D_k)_{ij})\%$ nach sich zieht.

Die im Ansatz in den Gleichungen (2.5) bis (2.7) gemachten Näherungen setzen kleine Änderungen dieser Größe voraus. Daher eignet sich diese Methode, die Auswirkungen kleiner Parameteränderungen zu studieren. In [13] wird daher von einer *Marginalanalyse* gesprochen.

Aufbauend auf der Marginalanalyse läßt sich nun nach [13] auch eine *Zuverlässigkeitsanalyse* (Reliability analysis) konstruieren. Der wesentliche Unterschied zur Marginalanalyse besteht darin, daß simultane Änderungen aller Koeffizienten a_{ij} , b_{ij} , α_i zugelassen werden. Gibt man für die Koeffizienten Bandbreiten der Form $a_{ij} \pm \Delta a_{ij}$, $b_{ij} \pm \Delta b_{ij}$, $\alpha_i \pm \Delta \alpha_i$ an, so folgt für die Umweltlast $\beta_k \pm \Delta \beta_k$ aus Gleichung (2.4)

$$(\beta_k \pm \Delta \beta_k) = \sum_{i=1}^q (b_{ki} \pm \Delta b_{ki})(p_i \pm \Delta p_i).$$

Daraus ergibt sich in erster Ordnung für $\Delta \beta_k$

$$\Delta \beta_k = \sum_{i=1}^q (b_{ki} \Delta p_i + p_i \Delta b_{ki}). \quad (2.8)$$

Einzigste Unbekannte in Gleichung (2.8) ist die Größe Δp_i , die sich analog zum Vorgehen bei der Marginalanalyse geschlossen analytisch darstellen läßt. Definiert man noch die Größen

$$\begin{aligned}\Delta(a_{ij}p_j) &:= a_{ij}(\Delta p_j) + (\Delta a_{ij})p_j, \\ \Delta(b_{ij}p_j) &:= b_{ij}(\Delta p_j) + (\Delta b_{ij})p_j,\end{aligned}$$

so ist die Zuverlässigkeitsmatrix

$$\Delta P = \begin{pmatrix} \Delta(a_{11}p_1) & \cdots & \Delta(a_{1q}p_q) & \Delta\alpha_1 \\ \vdots & & \vdots & \vdots \\ \Delta(a_{r1}p_1) & \cdots & \Delta(a_{rq}p_q) & \Delta\alpha_r \\ \Delta(b_{11}p_1) & \cdots & \Delta(b_{1q}p_q) & \Delta\beta_1 \\ \vdots & & \vdots & \vdots \\ \Delta(b_{s1}p_1) & \cdots & \Delta(b_{sq}p_q) & \Delta\beta_s \end{pmatrix}$$

berechenbar. Ihre Elemente enthalten nun die Bandbreiten für die in Abschnitt 2.2.2 diskutierte Matrix P , die spaltenweise die Beiträge der einzelnen Prozesse zu wirtschaftsfähigen Strömen und Umweltlasten angibt.

Die Methode erlaubt das Hochrechnen von Bandbreiten auf die Umweltbeiträge β_k . Nach [20] eignet sich diese Vorgehensweise aufgrund der Vernachlässigung von Termen höherer Ordnung für kleine Intervalle Δa_{ij} , Δb_{ij} , $\Delta\alpha_i$. Andererseits erlaubt die Methode lediglich die Abbildung von totalen Schwankungsbreiten, die bei Sachbilanzen im allgemeinen groß sind. Dies kann zu numerischen Ungenauigkeiten führen [20]. Die Zuverlässigkeitsanalyse erfordert auch einen großen Rechenaufwand, da zur Berechnung der Matrix ΔP die Determinante der Matrix A , die im allgemeinen von sehr hohem Rang ist, sowie aller Adjunkten erforderlich ist [13]. Löst man Gleichung (2.3) allerdings nach der Cramerschen Regel, ist diese Arbeit im wesentlichen schon geleistet. Die Berechnung der Matrix ΔP ist für Außenstehende nur schwer nachzuvollziehen. Das Verfahren ist in diesem Punkt nicht transparent.

Ein schwerwiegender Nachteil besteht darin, daß Korrelationen der Datenstreuungen nicht berücksichtigt werden.

Ein Vorteil der Methode liegt in der einfachen Interpretierbarkeit der Ergebnisse und ihrer übersichtlichen Darstellung in Form der Matrix ΔP .

2.3.3 Intervallarithmetik

In [20] wird vorgeschlagen, alternativ zur Sensitivitätsanalyse nach [13] mit Datenintervallen zu rechnen. Dabei bedient man sich der Intervallarithmetik.

Bezeichnet man die untere Grenze eines Intervalls mit $\underline{a}$ und die obere mit $\bar{a}$, so ergeben sich als Grundrechenregeln:

$$\begin{aligned}[\underline{a}, \bar{a}] + [\underline{b}, \bar{b}] &= [\underline{a} + \underline{b}, \bar{a} + \bar{b}], \\ [\underline{a}, \bar{a}] - [\underline{b}, \bar{b}] &= [\underline{a} - \bar{b}, \bar{a} - \underline{b}],\end{aligned}$$

$$\begin{aligned} [\underline{a}, \bar{a}] \times [\underline{b}, \bar{b}] &= [\min(\underline{ab}, \underline{a}\bar{b}, \bar{a}\underline{b}, \bar{a}\bar{b}), \max(\underline{ab}, \underline{a}\bar{b}, \bar{a}\underline{b}, \bar{a}\bar{b})], \\ [\underline{a}, \bar{a}] \div [\underline{b}, \bar{b}] &= [\underline{a}, \bar{a}] \times [1/\bar{b}, 1/\underline{b}] \quad \text{falls } 0 \notin [\underline{b}, \bar{b}]. \end{aligned}$$

Das Distributivgesetz bleibt nicht erhalten, es gilt nur in abgeschwächter Form:

$$[\underline{a}, \bar{a}] \times ([\underline{b}, \bar{b}] + [\underline{c}, \bar{c}]) \subseteq [\underline{a}, \bar{a}] \times [\underline{b}, \bar{b}] + [\underline{a}, \bar{a}] \times [\underline{c}, \bar{c}].$$

Ausgehend von der in Abschnitt 2.2.2 erläuterten Matrixelementmethode transformiert sich die Schlüsselgleichung (2.2) zu

$$\sum_{j=1}^q [\underline{a}_{ij}, \bar{a}_{ij}] p_j = [\underline{\alpha}_i, \bar{\alpha}_i]. \quad (2.9)$$

Da die a_{ij} und α_i stoffliche und energetische Ein- und Austräge der jeweiligen Prozesse repräsentieren, müssen Intervalle zugelassen werden. Die p_j hingegen geben den Beitrag der einzelnen Prozesse wieder. Sie stellen zu berechnende Zielgrößen dar, für die minimale und maximale Lösungen gesucht werden.

Beschränkt man sich zur Vereinfachung der folgenden Diskussion auf den Fall $p_j > 0 \forall j = 1, \dots, q$, so müssen die p_j folgende Bedingung erfüllen:

$$\begin{aligned} \left[\sum_{j=1}^q \underline{a}_{ij} p_j, \sum_{j=1}^q \bar{a}_{ij} p_j \right] \cap [\underline{\alpha}_i, \bar{\alpha}_i] &\neq \emptyset, \\ \forall i &= 1, \dots, q. \end{aligned}$$

Daraus ergeben sich unmittelbar folgende Ungleichungen:

$$\sum_{j=1}^q \underline{a}_{ij} p_j \leq \bar{\alpha}_i, \quad (2.10)$$

$$\sum_{j=1}^q \bar{a}_{ij} p_j \geq \underline{\alpha}_i, \quad (2.11)$$

$$\forall i = 1, \dots, q.$$

Führt man analoge Betrachtungen für andere Vorzeichenkombination von p_j durch, so ergeben sich q Sätze von Ungleichungen, entsprechend Gleichung (2.10) und Gleichung (2.11). Diese Ungleichungen beschreiben nun eine q -dimensionale Lösungshülle innerhalb derer alle Punkte $(p_1, \dots, p_q)$ Lösungen von Gleichung (2.9) darstellen.

Mit diesen $2q$ -Zwangsbedingungen lassen sich die üblichen Methoden der linearen Programmierung (siehe z.B. [21, 22]) zur Bestimmung der Zielfunktionen $z = \max(p_j)$ beziehungsweise $z = \min(p_j)$ einsetzen [20].

Treten innerhalb der Bilanzhülle keine Recyclingkreisläufe und keine Kuppelprodukte auf, so lassen sich nach [20] die gesuchten Größen $\underline{p}_j, \bar{p}_j$ aus der Matrixgleichung

$$[\underline{p}, \bar{p}] = [\bar{A}^{-1} \underline{\alpha}, \underline{A}^{-1} \bar{\alpha}]$$

auch analytisch bestimmen. Den Regelfall stellt aber der Einsatz der linearen Programmierung dar [20].

Der Vorteil dieser Vorgehensweise gegenüber der Sensitivitätsanalyse nach [13] besteht vor allem in der größeren Genauigkeit bei großen Intervallen. Die Vernachlässigung höherer Ordnungen im Differentialkalkül in [13], wie in Abschnitt 2.3.2 erläutert, führt bei großer Bandbreite der Daten zu Ungenauigkeiten [20].

Zwar ist das Zustandekommen der $\underline{p}_j$ und $\bar{p}_j$ für einen Außenstehenden nur unter Einsatz der linearen Programmierung nachzuvollziehen, doch lassen sich die Ergebnisse anhand Gleichung (2.9) leicht verifizieren.

Nachteilig wirkt sich aus, daß für alle Parameter nur der günstigste und ungünstigste Fall berechnet wird. Für die Ergebnisse sind daher große bis sehr große Intervalle zu erwarten. Das Konzept unterstellt die Existenz einer Prozeßkette, in der alle Parameter ungünstig bzw. günstig ausfallen, selbst wenn dies verfahrenstechnisch ausgeschlossen ist, mit gleicher Wahrscheinlichkeit wie Prozeßketten mit beliebigen Parameterwerten.

Im folgenden wird dies am Beispiel der Roheisenerzeugung in Hochofen mit und ohne Kohleeinblasung illustriert. In einem Fall werden etwa 500 kg Koks, im anderen 400 kg Koks mit 100 kg Steinkohle zur Reduktion des Eisenerzes benötigt.⁶ Für den Reduktionsmittelbedarf ergeben sich folgende Intervalle:

$$\begin{array}{ll} \text{Koks:} & [400 \text{ kg} ; 500 \text{ kg}], \\ \text{Steinkohle:} & [0 \text{ kg} ; 100 \text{ kg}]. \end{array}$$

Veranschlagt man Koks und Steinkohle überschlägig mit einem Heizwert von 30 MJ/kg, so ergibt sich aus der Intervallarithmetik für den Energiebedarf einen Bereich von [1,2 GJ ; 1,8 GJ], obwohl die Lösung für beide Hochofen mit den gewählten Werten bei exakt 1,5 GJ liegt. Die Korrelation von Koks- und Steinkohlebedarf wird mit den Intervallen nicht erfaßt.

2.3.4 Monte Carlo-Modell

In [23] wird vorgeschlagen, ein Monte Carlo-Modell zur Bestimmung der Datenstreuung einzusetzen. Bei einem solchen Modell werden die Verteilungsfunktionen der zu variierenden Modellparameter bestimmt. Mittels eines Zufallszahlengenerators wird für jeden Durchlauf ein Satz dieser Parameter unter Berücksichtigung ihrer Verteilungen ausgewählt.⁷ Auf Basis der ausgewählten Parameter werden die Zielgrößen berechnet und gespeichert. Nun beginnt der nächste Durchlauf. Auf diese Weise läßt sich die Verteilung der Zielgrößen bestimmen. Im Falle einer Sachbilanz stellen die stofflichen und energetischen Ein- und Austräge der Einzelprozesse die zu variierenden Modellparameter dar. Die Vorgehensweise in [23] ist in Abbildung 2.5 als Flußdiagramm dargestellt.

⁶ Alle Werte sind Anhaltswerte. Es sind auch andere Anteile an Einblaskohle denkbar. Die gewählten Werte dienen lediglich zur Illustration.

⁷ Man spricht auch davon, daß die Größen gewürfelt werden, daher rührt der Begriff Monte Carlo-Methode.

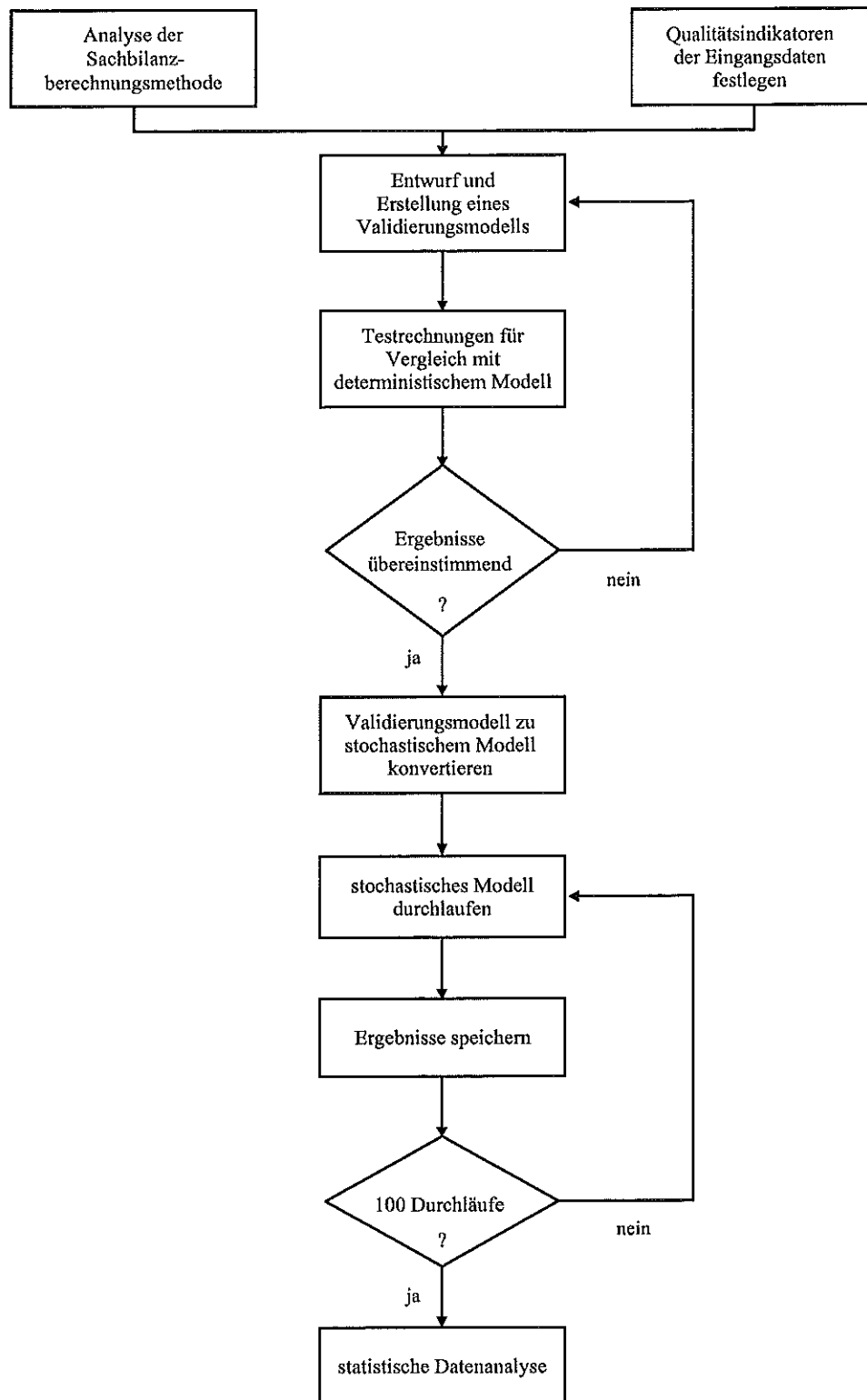


Abbildung 2.5: Flußdiagramm zum Einsatz eines Monte Carlo-Modells zur Bestimmung der Verteilungsfunktion von Sachbilanzergebnissen nach [23].

Die Vorgehensweise setzt die Existenz einer üblichen Sachbilanz in Form einer der gängigen Berechnungsalgorithmen, wie sie in Abschnitt 2.2 erläutert werden, voraus. Parallel zur Sichtung des Bilanzierungsalgorithmus sollen die Verteilungsfunktionen der Eingangs- und Ausgangsdaten der Einzelprozesse bestimmt werden. Da diese jedoch im allgemeinen unbekannt sind, wurde die Form der Verteilung und Variationsbreite nach zehn vorgegebenen Musterverteilungen durch die Bilanzierer klassifiziert. Diese Klassifikation entspricht prinzipiell den von der SETAC nach Abschnitt 2.3.1 geforderten Datenqualitätsindikatoren. Zugelassen wurden nur symmetrische Verteilungen, um gleiche Wahrscheinlichkeit für Werte oberhalb und unterhalb des Mittelwertes sicherzustellen. Dies erschien den Autoren angemessen, da außer der Klassifizierung durch die Bilanzierer und die Mittelwerte keine weiteren Informationen zur Verfügung standen [23].

Im nächsten Schritt wurde nun das eigentliche Monte Carlo-Modell konstruiert. Zunächst wurden allerdings alle Parameter auf ihren jeweiligen Mittelwert fixiert, um so die Ergebnisse von Testrechnungen mit denen des ursprünglichen deterministischen Modells vergleichen zu können. Stimmen die Aussagen überein, gilt das Modell als validiert, und die Parameter werden im Rahmen der oben erläuterten Methode variiert.

Nun wurde in 100 Rechenläufen ein Datensatz an Sachbilanzergebnissen produziert. Die Zahl 100 wurde gewählt, um nach dem zentralen Grenzwertsatz der Statistik (siehe Abschnitt 3.1) eine annähernde Normalverteilung der Ergebnisdaten zu erreichen. Diese annähernde Normalverteilung der Ergebnisse erlaubt eine Interpretation mittels gängiger statistischer Instrumente.

Gegen diese Vorgehensweise sind an erster Stelle methodische Einwände zu erheben. Die Ergebnisse eines Monte Carlo-Modells können nicht genauer sein, als die Genauigkeit der eingespeisten Verteilungen. Sind diese Verteilungen geschätzt, gilt dies grundsätzlich auch für das Ergebnis.

Als weiterer Nachteil dieser Methode ist der enorme Aufwand zu nennen. So muß zusätzlich zur kompletten Sachbilanz mit dem Monte Carlo-Modell eine stochastische Version derselben erstellt werden. Der eigentliche Charme dieser Vorgehensweise, die Möglichkeit, beliebige Verteilungen der Parameter verarbeiten zu können, kommt dabei nicht zum Tragen, weil die Verteilungsfunktionen im allgemeinen nicht bekannt sind. Sollen Kovarianzen, die die Korrelationen zwischen den Verteilungsfunktionen beschreiben (siehe Abschnitt 3.1 und Abschnitt 3.2) berücksichtigt werden, erhöht sich der Aufwand der Modellkonstruktion weiter. Der von den Autoren unter anderem bestimmte Standardfehler ist direkt abhängig von der willkürlich gewählten Anzahl der Modelldurchläufe und besitzt damit keine Aussagekraft.

Ein gewichtiger Vorteil besteht sicherlich darin, alle Datenqualitätsindikatoren, die beschreibbare Auswirkungen auf die Parameterverteilungen haben, berücksichtigen zu können.

Kapitel 3

Statistische Fehlerabschätzung

Bevor in diesem Kapitel auf die statistische Fehlerabschätzung in Sachbilanzen eingegangen wird, werden die benötigten Instrumente der Statistik und Fehlerrechnung bereitgestellt. In Abschnitt 3.2 wird die grundsätzliche Anwendbarkeit und Interpretation der Vorgehensweise diskutiert. Diese Fragestellung wird in Kapitel 5 noch einmal aufgegriffen und um exemplarische Analysen ergänzt. Weiter wird die entwickelte Vorgehensweise bei der Anwendung statistischer Fehlerabschätzung in Sachbilanzen erläutert.

Der entscheidende Vorteil der statistischen Fehlerabschätzung gegenüber dem Konzept der Datenqualitätsindikatoren liegt in der Fortpflanzbarkeit der Datenstreuungen von den Einzelprozessen bis in die Sachbilanz hinein. Mit der Streuung der Daten kann das wohl wichtigste Qualitätsmerkmal erfaßt werden, für qualitative Größen ist die statistische Fehlerabschätzung jedoch ungeeignet.¹ Verglichen mit Intervallarithmetik und Zuverlässigkeitsanalyse wird eine differenziertere Fehlerfortpflanzung ermöglicht. Bei diesen beiden Verfahren wirken sich die Streuungen stets gleichseitig aus und addieren sich damit linear, auch wenn keine Korrelation zwischen den Streuungen besteht. Dies führt zu einer Überschätzung der resultierenden Streubereiche. Bei der statistischen Fehlerabschätzung hingegen heben sich bei der Addition von Werten mit unkorrelierten Streuungen diese teilweise weg, da Abweichungen vom Mittelwert nach oben und unten gleich wahrscheinlich sind. Korrelationen lassen sich gezielt über Kovarianzterme erfassen. Gegenüber dem Monte Carlo-Modell erweist sich die statistische Methode bezüglich Datenverfügbarkeit und Aufwand deutlich angemessener.

Schwierigkeiten bei der Anwendung der Fehlerrechnung bereiten eine verschiedenartige Entstehung und Dokumentation sowie der Umfang der verfügbaren Datenbasis. Die Fehlerrechnung wird daher flexibilisiert, um die Bandbreite verarbeitbarer Daten möglichst groß zu gestalten. Es wird eine Methode vorgeschlagen, Bereichsangaben in Form von Intervallen in Kombination mit Einzelwerten einzubinden. Ebenso wird eine Vorgehensweise zur Handhabung einzelner Angaben ($n = 1$) aufgezeigt.² Darüber hinaus wird eine Metho-

¹Eine Ausnahme bildet die Information „Wert ist Anhaltswert“, wie in Abschnitt 3.2.2 dargelegt wird.

²Ein Einzelwert enthält keine Information über die Streuung der Werte. In diesem Fall ($n = 1$) weisen Standardabweichung und Standardabweichung des Mittelwertes folgerichtig eine Singularität auf.

de vorgestellt, die es erlaubt, stoffliche und energetische Ein- und Austräge einzubeziehen, die bereits über mehrere Einzelprozesse aufaddiert wurden. Damit können Datenquellen unterschiedlicher Auflösungen der Prozeßkette in Einzelprozesse erfaßt werden. Darüber hinaus wurde analysiert, in welchen Fällen Kovarianzen auftreten und welche Relevanz sie für die Fehlerabschätzung aufweisen.

3.1 Statistik und Fehlerrechnung

Eine Größe x , die statistischen Schwankungen unterliegt, läßt sich durch Angabe der Wahrscheinlichkeitsdichte $f(x)$ charakterisieren. Die Größe

$$f(x) dx$$

beschreibt die Wahrscheinlichkeit, daß eine Messung der Größe x einen Wert zwischen x und $x+dx$ liefert [24]. Die Wahrscheinlichkeit für x , einen Wert aus dem Definitionsbereich $\mathcal{D}$ zu finden, ist zu 1 festgelegt:

$$1 = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx \quad (\text{mit } \mathcal{D} =]-\infty; +\infty[).$$

Der Mittelwert μ ergibt sich dann als Erwartungswert von x :

$$\mu = \int_{-\infty}^{\infty} x f(x) dx.$$

Die Standardabweichung σ ist dabei wie folgt definiert:

$$\sigma^2 := \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu)^2 f(x) dx.$$

Sie ist ein Maß für die Breite der Verteilung und damit auch für die zu erwartende Streuung von unabhängigen Meßwerten. Eine kontinuierlich verteilte Zufallsgröße unterliegt häufig der Normal- oder Gaußverteilung [26]. Sie ist von zentraler Bedeutung in der Statistik: „Die Rolle der Normalverteilung in der Statistik ähnelt der der Geraden in der Geometrie.“ [27]. Sie liefert eine wertvolle Beschreibung vieler Verteilungsfunktionen in Physik, Technik und Sozialwissenschaften [24, 25, 26]. Abbildung 3.1 zeigt zwei Normalverteilungen mit verschiedenen Standardabweichungen.

Durch die Angabe von Mittelwert und Standardabweichung ist die Normalverteilung eindeutig bestimmt. Bei einer Messung sind aber diese wahren Größen nicht bekannt. Sie müssen aus den Meßwerten geschätzt werden. Dazu werden die korrespondierenden empirischen Größen des empirischen Mittelwertes $\bar{x}$ und der empirischen Standardabweichung s eingeführt [26]:

$$\bar{x} := \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (3.1)$$

$$s^2 := \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2, \quad (3.2)$$

x_i : Meßwerte, n : Anzahl Meßwerte.

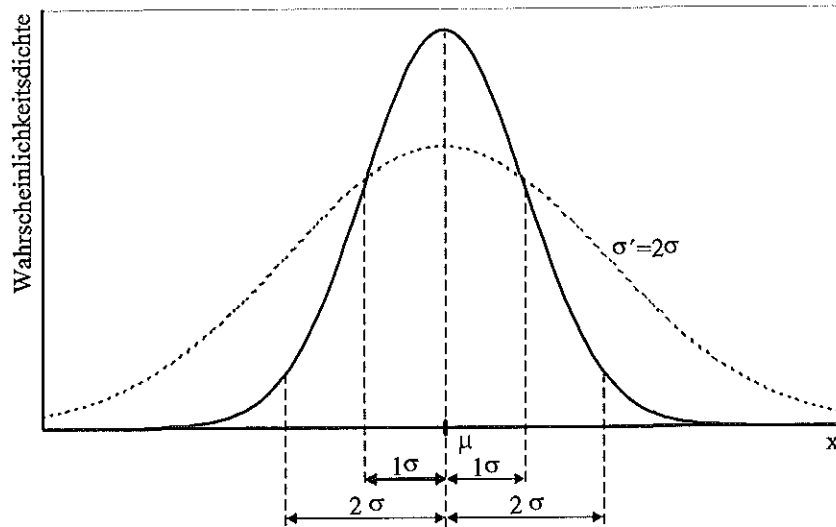


Abbildung 3.1: Die durchgezogene Linie zeigt eine Normalverteilung mit dem Mittelwert μ und der Standardabweichung σ . Der 1σ - und 2σ -Bereich um den Mittelwert μ wird graphisch veranschaulicht. Der gestrichelte Graph verdeutlicht die Auswirkung bei Verdopplung der Standardabweichung.

Die Definitionen (3.1) und (3.2) kommen auch für nicht oder nur annähernd normalverteilte Größen zum Einsatz. Der Mittelwert charakterisiert die Lage und die Standardabweichung die Streuung der Werte. Im Rahmen der Gaußverteilung läßt sich die Standardabweichung auch anschaulich interpretieren. Abbildung 3.1 deutet die Bedeutung der Standardabweichung als Streuungsmaß an.

Im Grenzfall unendlich vieler Messungen läßt sich der Anteil der Werte angeben, die in Umgebungen um den Mittelwert μ gefunden würden [24]:

$$\begin{aligned} [\mu - 1\sigma, \mu + 1\sigma]: & \quad 68,3\% \\ [\mu - 2\sigma, \mu + 2\sigma]: & \quad 95,4\% \\ [\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma]: & \quad 99,7\% \end{aligned}$$

Die Messung der n Werte x_i läßt sich interpretieren als eine Stichprobennahme aus unendlich vielen möglichen Messungen. Die Mittelwerte solcher Stichproben streuen ihrerseits um den gesuchten wahren Wert.

Der zentrale Grenzwertsatz der Statistik besagt, daß die Summe unabhängiger Zufallsgrößen $\sum_i^n x_i$ im Grenzfall $n \rightarrow \infty$ einer Normalverteilung unterliegt. Dabei werden nur sehr schwache Voraussetzungen an die Ausgangsverteilungen gestellt. Diese werden von in der Praxis auftretenden Verteilungen im allgemeinen erfüllt [26].

Da die Mittelwerte $\bar{x}$ im wesentlichen durch Summation gebildet werden, sind sie eher

normalverteilt als die Einzeldaten x_i . Die Standardabweichung der Mittelwerte m läßt sich empirisch schätzen zu [24]

$$m^2 := \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = \frac{s^2}{n}. \quad (3.3)$$

Die Standardabweichung des Mittelwertes wird auch als Standardfehler oder mittlerer quadratischer Fehler des Mittelwertes bezeichnet. Der Begriff „Fehler“ rührt daher, daß m als Maß dafür interpretiert werden kann, wie gut der wahre Wert durch den Mittelwert der Messungen wiedergegeben wird.

Unterliegen die Meßwerte x_i einer Normalverteilung, so streuen die Mittelwerte $\bar{x}$ um den wahren Wert μ gemäß einer t -Verteilung, auch als Student-Verteilung bezeichnet [28]. Diese ist vom Umfang der Stichprobe n abhängig. Für $n \rightarrow \infty$ geht sie, wie oben erläutert, in eine Normalverteilung über. Mit Hilfe der t -Verteilung läßt sich ein Vertrauensintervall $[\bar{x} - t_S, \bar{x} + t_S]$ angeben, in dem ein Wert mit der Wahrscheinlichkeit S liegt. Für die Mittelwerte ergibt sich als Vertrauensintervall [28]:

$$[\bar{x} - m \cdot t_S, \bar{x} + m \cdot t_S].$$

Die Werte t_S sind nicht elementar zu berechnen und werden daher in Abhängigkeit des Freiheitsgrades f tabelliert. Für den Freiheitsgrad gilt in diesem Fall: $f = n - 1$. Tabelle 3.1 sind einige Werte der Student-Verteilung zu entnehmen.

Tabelle 3.1: Werte der Student-Verteilung nach [28] für ein Vertrauensniveau von 95% und 99%.

f	t_S	
	S=95%	S=99%
1	12,71	63,66
2	4,303	9,925
3	3,182	5,841
4	2,776	4,604
5	2,571	4,032
6	2,447	3,707
7	2,365	3,499
8	2,306	3,355
9	2,262	3,250
10	2,228	3,169
100	1,984	2,626
200	1,972	2,601
∞	1,960	2,576

Das Vertrauensniveau wird schnell drastisch kleiner und approximiert schon bei geringer Anzahl von Eingabewerten den Grenzwert. Die Student-Verteilung gilt streng nur, wenn die Einzelwerte x_i einer Normalverteilung unterliegen. Gesicherte Aussagen über das Vertrauensniveau beliebig verteilter Größen setzt die Kenntnis der Verteilungen voraus.

Wird der Meßwert x_i mit der Häufigkeit h_i gemessen, so ergeben sich die empirischen Kenngrößen der Verteilung aus

$$\begin{aligned}\bar{x} &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n h_i x_i, \\ s^2 &= \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^n h_i (x_i - \bar{x})^2 \quad N \neq 1, \\ N &:= \sum_{i=1}^n h_i.\end{aligned}\tag{3.4}$$

Im Falle $N = 1$ tritt in Gleichung (3.4) eine Singularität auf. Dies kommt daher, daß bei $N = 1$ nur die relativen Häufigkeiten bekannt sind. Den Übergang von $s^2 = \frac{1}{n} \sum (x_i - \bar{x})^2$ zur Gleichung (3.2) bezeichnet man als Bessel-Korrektur. Diese besagt, daß im Nenner die Häufigkeit um 1 zu reduzieren ist, um die beste Schätzung der Standardabweichung zu erhalten. Sind nur die relativen Häufigkeiten bekannt, muß diese Korrektur unterbleiben, und es gilt näherungsweise [28]

$$s^2 = \frac{1}{\sum_{i=1}^n h_i} \sum_{i=1}^n h_i (x_i - \bar{x})^2.$$

Sollen gewichtete Mittelwerte gebildet werden, so tritt in der Regel eine ähnliche Situation ein. Im allgemeinen hat man Einzelwerte, die beispielsweise bestimmte Produktionsanteile repräsentieren. Damit ist die Wahrscheinlichkeit, mit der der Meßwert zu erwarten ist, bekannt. Dies entspricht aber gerade der Information der relativen Häufigkeit mit der der Wert bei einer umfangreichen Messung gefunden würde. Mit diesen Überlegungen und nach [24, 28] ergibt sich:

$$\begin{aligned}\bar{x} &= \frac{1}{\sum_{i=1}^n g_i} \sum_{i=1}^n g_i x_i, \\ s^2 &= \frac{1}{\sum_{i=1}^n g_i} \sum_{i=1}^n g_i (x_i - \bar{x})^2, \\ m^2 &= \frac{1}{(n-1) \sum_{i=1}^n g_i} \sum_{i=1}^n g_i (x_i - \bar{x})^2,\end{aligned}$$

g_i : Gewicht.

Ein sehr nützliches Hilfsmittel für konkrete Berechnungen stellt der Verschiebungssatz für Momente zweiter Ordnung dar:

$$\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = \sum_{i=1}^n (x_i - a)^2 - n(\bar{x} - a)^2, \quad (3.5)$$

a : beliebige Konstante.

Er erlaubt es zunächst, das Moment zweiter Ordnung bezüglich eines beliebigen Wertes a zu berechnen. Später läßt sich daraus das Moment zweiter Ordnung bezogen auf $\bar{x}$ berechnen, aus welchem sich unmittelbar Standardabweichung und Standardabweichung des Mittelwertes bestimmen lassen.

Damit sind die Instrumente bereitgestellt, die zur Behandlung der jeweiligen Einzelprozesse innerhalb der Prozeßkette benötigt werden. Um die Auswirkungen auf die Bilanzergebnisse abschätzen zu können, müssen die Transformationseigenschaften von Mittelwerten und Streuungsmaßen für lineare Abbildungen bestimmt werden. Nach [26] transformieren sich die Mittelwerte für Addition und Subtraktion von Zufallsgrößen X, Y wie die Einzelwerte:

$$Z = X + Y \Rightarrow \mu_Z = \mu_X + \mu_Y,$$

bei der Multiplikation hingegen kommt ein Zusatzterm hinzu:

$$Z = X \cdot Y \Rightarrow \mu_Z = \mu_X \cdot \mu_Y + \sigma_{XY},$$

σ_{XY} : Kovarianz.

Die Kovarianz σ_{XY} ist definiert als Erwartungswert des gemischten Produktes $(x - \mu_X)(y - \mu_Y)$:

$$\sigma_{XY} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu_X)(y - \mu_Y) f(x, y) dx dy. \quad (3.6)$$

Sind die Größen X und Y unabhängig voneinander, beeinflußt sich also die Wahrscheinlichkeit, bestimmte Werte zu messen, nicht untereinander, so läßt sich die Dichtefunktion faktorisieren:

$$f(x, y) = f_1(x)f_2(y). \quad (3.7)$$

Damit zerfällt das Doppelintegral in Gleichung (3.6) zu

$$\begin{aligned} \sigma_{XY} &= \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu_X) f_1(x) dx \int_{-\infty}^{\infty} (y - \mu_Y) f_2(y) dy \\ &= (\mu_X - \mu_X)(\mu_Y - \mu_Y) \\ &= 0. \end{aligned}$$

Die Kovarianz unabhängiger Größen verschwindet also stets. In der Regel sind die Eingangs- und Ausgangsdaten verschiedener Einzelprozesse unabhängig voneinander. Dann transformiert sich auch der Mittelwert des Produktes wie die Einzelwerte

$$\begin{aligned} Z = X \cdot Y &\Rightarrow \mu_Z = \mu_X \cdot \mu_Y, \\ \sigma_{XY} &= 0. \end{aligned}$$

Für die empirischen Größen gilt entsprechend [29]:

$$s_{xy} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}), \text{ bzw. } s_{xy} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n g_i} \sum_{i=1}^n g_i (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}),$$

$$z = x + y \Rightarrow \bar{z} = \bar{x} + \bar{y},$$

$$z = x \cdot y \Rightarrow \bar{z} = \bar{x} \cdot \bar{y}.$$

Um die Transformation der Standardabweichung σ zu bestimmen, muß das Integral

$$\sigma_z^2 = \int_{-\infty}^{\infty} (z(x, y) - \mu_z)^2 f(x, y) dx dy$$

betrachtet werden. Die Funktion $z(x, y)$ wird zunächst an der Stelle $\vec{\mu} = (\mu_1, \dots, \mu_n)$ nach Taylor entwickelt. Bricht man die Entwicklung nach Termen erster Ordnung ab, so ergibt sich

$$z \approx z(\mu_x, \mu_y) + \frac{\partial z}{\partial x}(x - \mu_x) + \frac{\partial z}{\partial y}(y - \mu_y) + \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y}(x - \mu_x)(y - \mu_y), \quad (3.8)$$

wobei alle Ableitungen an der Stelle μ_x bzw. μ_y zu nehmen sind.

Aus dieser Näherung erhält man unter Übergang zu den empirischen Größen $\bar{x}_i, s_{x_i}$ [30, 26]

$$s_z^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial z}{\partial x_i} \right)^2 s_{x_i}^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n \frac{\partial z}{\partial x_i} \frac{\partial z}{\partial x_j} s_{x_i x_j}. \quad (3.9)$$

Diese Transformationsgleichung wird als Gaußsches Fehlerfortpflanzungsgesetz bezeichnet und läßt sich nach Gleichung (3.3) sowohl auf die Standardabweichung als auch auf die Standardabweichung des Mittelwertes anwenden. Gleichung (3.9) gilt weitgehend unabhängig von der Verteilung, der die Größen X_i unterliegen. Es wird Gebrauch davon gemacht, daß die Streuungsmaße σ klein gegen die Mittelwerte und die Verteilungen annähernd symmetrisch sind. In diesem Sinne stellt Gleichung (3.9) eine Abschätzung dar, die mit zunehmenden relativen Streuungen ungenauer wird. In die Summanden in Gleichung (3.8) gehen auch die Ableitungen von Z ein. Auch die Form der Funktion $Z(\vec{X})$ beeinflußt damit die Genauigkeit der Abschätzung.

Die Näherung in Gleichung (3.8) gilt exakt, wenn z eine lineare Funktion der x_i ist. Dann gilt auch Gleichung (3.9) exakt, sieht man vom Übergang der wahren zu den empirischen Größen ab. Streng genommen wird nur dieser Fall als Fehlerfortpflanzungsgesetz bezeichnet [30]. Es ist jedoch üblich, den Begriff auf den allgemeinen Fall anzuwenden, in diesem Sinne wird er auch in dieser Arbeit verwendet. In analoger Herleitung zu oben läßt sich aus Gleichung (3.8) auch der allgemeine Ausdruck für den Mittelwert ableiten [26]:

$$\bar{z} = z(\bar{x}_1, \dots, \bar{x}_n) + \frac{1}{2!} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n \frac{\partial^2 z}{\partial x_i \partial x_j} s_{x_i x_j} + \frac{1}{2!} \sum_{i=1}^n \frac{\partial^2 z}{\partial x_i^2} s_{x_i}^2.$$

Wie schon erwähnt, sind die Eingangs- und Ausgangsströme der Einzelprozesse im allgemeinen unabhängig, und die Kovarianzen verschwinden. Darüber hinaus trägt der Kovarianzterm auch für abhängige Größen bei additiver Verknüpfung der x_i nicht bei. Der

dritte Term verschwindet für lineare Funktionen z stets.

Die Anwendung der Fehlerrechnung erfordert in der Praxis gelegentlich auch Abschätzungen. Solche Abschätzungen sind stets so vorzunehmen, daß der Fehler nicht unterschätzt wird. Andernfalls kann die Aussagekraft der Ergebnisse überschätzt werden, und es sind Fehlschlüsse möglich. Im Zweifel ist daher eher eine Überschätzung der Streuung in Kauf zu nehmen. Solche Abschätzungen bezeichnet man in der Physik als konservativ, da die wesentliche Aussagekraft der Fehler erhalten bleibt.

Wird das Fehlerfortpflanzungsgesetz auf die Mittelwertbildung gemäß Gleichung (3.1) angewandt, so erhält man

$$s_{\text{int}}^2 = \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n s_{x_i}^2,$$

$$m_{\text{int}}^2 = \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n m_{x_i}^2.$$

Wird also über Größen gemittelt, die selbst schon mit Streuungen behaftet sind, steht damit eine zweite Möglichkeit, die Streuungen abzuschätzen, zur Verfügung. Die Größen m_i , s_i werden als internes oder inneres Streumaß bezeichnet, die Berechnung nach Gleichung (3.2) und (3.3) entsprechend als externes oder äußeres Streumaß. Entstammen die Stichproben einer Normalverteilung, so gehen innere und äußere Streuung für $n \rightarrow \infty$ ineinander über [24].

Bei gewichteter Mittelwertbildung ergibt sich

$$s_{\text{int}}^2 = \frac{1}{(\sum_{i=1}^n g_i)^2} \sum_{i=1}^n g_i^2 s_{x_i}^2, \quad (3.10)$$

$$m_{\text{int}}^2 = \frac{1}{(n-1)^2 (\sum_{i=1}^n g_i)^2} \sum_{i=1}^n g_i^2 s_{x_i}^2. \quad (3.11)$$

Im Sinne einer konservativen Abschätzung ist jeweils der größere der beiden Werte weiter zu berücksichtigen.

3.2 Adaption für Sachbilanzen

In diesem Abschnitt wird der Frage nach der Anwendbarkeit der in Abschnitt 3.1 eingeführten Methoden nachgegangen und ihre Interpretation im Rahmen der Sachbilanzierung dargestellt. Im Anschluß daran werden die Instrumente entwickelt und diskutiert, welche für die konkrete Erstellung einer Sachbilanz benötigt werden.

Zunächst wird ein einzelner Prozeß aus der Prozeßkette betrachtet, der aus einer Einzelanlage bestehen möge. Mittels je einer Messung werden die Eingangs- und Ausgangsgrößen dieser Anlage bestimmt. Werden die Messungen wiederholt, so wird man zu abweichenden Ergebnissen aufgrund endlicher Meßgenauigkeit und Variationen in den äußeren Bedingungen³ kommen. In der Regel sind diese Variationen klein, und es liegt der Fall vor, auf den sich die statistischen Methoden nach Abschnitt 3.1 anwenden lassen. Es können allerdings auch große Schwankungen auftreten. So hängt beispielsweise der Schrottanfall beim Stanzen von Blechteilen stark von der Bauteilgeometrie ab. Eine rein statistische Mittelung ist nun nicht völlig korrekt, da der Schrottanfall stark deterministisch von der gewünschten Geometrie bestimmt wird. Werden die Messungen für jede in der Bilanz betrachtete Teilgeometrie durchgeführt, kann getrennt für jeden Fall gemittelt werden. Steht diese Datenfülle nicht zur Verfügung, so wird man durch Vergleich des Schrottanfalls bei verschiedenen Bauteilgeometrien einen typischen Wert und dessen Genauigkeit abschätzen und verwenden. Übertragen auf die Statistik bedeutet dies Mittelwertbildung über verschiedene Geometrien und Bestimmung der empirischen Streuparameter. Das Verhalten des Systems wird also als ein statistisches mit großen Streubreiten angenähert. Läßt man in dem Prozeß weitere, verfahrensgleiche Anlagen zu, so ist eine Mittelung über diese Anlagen erforderlich. Stehen für jede Anlage ein Satz Meßwerte zur Verfügung, kann die Streuung der Mittelung über beide Anlagen auf zwei Arten bestimmt werden.

Eine Möglichkeit besteht darin, die Streuungen der Einzelanlagen zu bestimmen und ihre Auswirkungen auf den Mittelwert per Fehlerfortpflanzungsgesetz zu berechnen. Dies wird als inneres Streumaß bezeichnet. Das äußere Streumaß berücksichtigt die Streuungen der Einzelanlagen nicht und wird aus der statistischen Streuung der Mittelwerte der Einzelanlagen bestimmt. Eine Diskussion von innerer und äußerer Streuung wurde bereits im Abschnitt 3.1 geführt. Im Sinne einer konservativen Abschätzung ist das größere der beiden Streuungsmaße zu akzeptieren.

Stehen keine Angaben zu den Streuungen bei den Einzelanlagen zur Verfügung, kann die innere Streuung nicht berechnet werden. Unterscheiden sich die Anlagenmittelwerte im Rahmen der abgeschätzten Streuungen kaum, sind sich die Anlagen sehr ähnlich, und die Messungen unterliegen näherungsweise einer gemeinsamen Verteilung. In diesem Fall nähern sich interne und externe Streuung an, und letztere stellt somit eine zulässige Abschätzung dar. Streuen die Anlagenmittelwerte hingegen stärker als nach ihren Standardabweichungen zu erwarten, liefert die äußere Streuung den größeren Wert. Auch in diesem Falle ist die Abschätzung durch die äußere Streuung konservativ und wiederum

³Dabei kann es sich beispielsweise um schwankende Qualitäten der zu bearbeitenden Materialien, Spannungsschwankungen im Stromnetz oder ähnliches handeln.

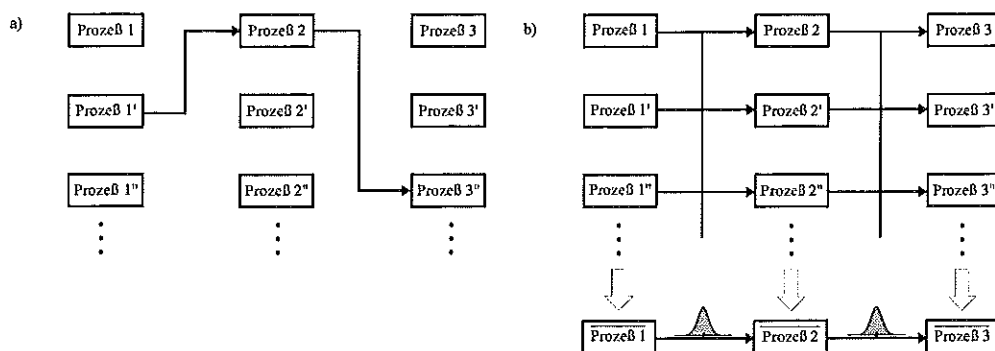


Abbildung 3.2: Vergleich des Prozeßkettenkonzepts einer exemplarischen Prozeßkette auf Basis von Einzelwerten (a) und einer gemittelten Prozeßkette mit Fehlerabschätzung (b).

zulässig.

Dieses Konzept der internen und externen Streuung erlaubt nun prinzipiell die Betrachtung beliebig aggregierter Prozesse. Doch je genauer die Prozeßkette aufgelöst wird und je mehr Daten für die mit den Prozessen verknüpften Stoffströmen zur Verfügung stehen, um so fundierter sind die Ergebnisse. Der anzustrebende und kaum realisierbare Idealzustand ist die Auflösung der Prozeßkette bis zu den Einzelanlagen und die Erfassung von deren Streuungen. Je näher aber dieser Zustand approximiert wird, um so zuverlässiger ist die Streuungsabschätzung. Brauchbare und relativ einfach zu berechnende Abschätzungen dürfen für die Auflösung, die Prozeßketten normalerweise aufweisen, erwartet werden. In der Regel stehen dann für jeden Prozeß in der Prozeßkette Einzelwerte aus verschiedenen Quellen für verschiedene Anlagen zur Verfügung. Dieser Punkt wird in der Auswertung der Fallstudie in Kapitel 5 noch einmal aufgegriffen.

Abbildung 3.2 verdeutlicht das Prozeßkettenkonzept, das auch der in Kapitel 4 diskutierten Fallstudie zugrunde liegt.

Aus der Betrachtung möglichst vieler gleichartiger Einzelprozesse heraus wird eine gewichtet gemittelte Prozeßkette gebildet, die den mittleren realen Bedingungen möglichst nahe kommt. Zusätzlich wird die Information über die Streuung der prozeßspezifischen Daten durch die Prozeßkette transportiert.

Die Fehlerabschätzung liefert Informationen darüber, wie sich die Streuungen in den Eingangsdaten der Bilanz auf die Gesamtbilanz auswirken.

Die stochastische Fehlerabschätzung macht Gebrauch von den Fehlerabschätzungen der Mittelwerte und der Fehlerfortpflanzung, wie sie in Kapitel 3.1 bereitgestellt wurden. Das Fehlerfortpflanzungsgesetz stellt dabei im Fall der Multiplikation eine Abschätzung erster Ordnung dar. Damit unterliegt sie prinzipiell ähnlichen Beschränkungen bei großen Streuungen wie die in Kapitel 2.3.2 diskutierte Zuverlässigkeitsanalyse nach [13]. Der Gültigkeitsbereich der Näherung ist jedoch größer, da eine intervallbehaftete Größe $x \pm \Delta x$ sich näherungsweise abbilden läßt auf $x \pm 2s$, wie in Kapitel 3.2.2 erläutert wird. Die Größe des Streuungsmaßes halbiert sich damit.

Für sehr große Streuungen werden die Ergebnisse numerisch jedoch unsicher. Es läßt sich lediglich die Information „Wert sehr unsicher“ transportieren.

Die Methode benötigt auch möglichst viele Einzeldaten, um verlässliche Ergebnisse zu liefern. In der Fallstudie wurde versucht, eine möglichst breite Datenbasis zusammenzutragen. Trotzdem basiert die Fehlerabschätzung teilweise auf nur wenigen Daten. Hier muß das Prinzip des Vorgehens nach bestem Wissen zugrundegelegt werden. Wenn nur wenige Vergleichsdaten zur Verfügung stehen, kann eine Abschätzung der Streuung entsprechend dem Grad an Unwissenheit nur unsicher sein. Falls bekannt, kann die Abschätzung hier durch die Angabe eines konservativen Bereiches ergänzt oder ersetzt werden. Die Anzahl der Einzelwerte ist bei den Prozessen zu dokumentieren, um ein Maß für die Qualität der Fehlerabschätzung zu liefern. Bei der Interpretation der Standardabweichungen muß dies berücksichtigt werden. Handelt es sich um repräsentative Werte und unterliegen sie näherungsweise einer Normalverteilung, liefern auch wenige Werte noch ein brauchbares Vertrauensniveau, wie in Abschnitt 3.1 erläutert.

Im folgenden wird zunächst der Einsatz statistischer Fehlerabschätzung bei der Bilanzierung nach der Matrix-Methode diskutiert. Anschließend wird das Vorgehen bei der sequentiellen Methode dargestellt. Diese Methode wurde auch in der Fallstudie eingesetzt.

Die Matrix-Methode nach [13] zur Berechnung von Sachbilanzen beruht auf der simultanen Lösung linearer Gleichungen. Das Fehlerfortpflanzungsgesetz stellt nun nichtlineare Zusammenhänge her, wie aus Gleichung (3.9) abzulesen ist.

Die Berechnung nach der Matrixmethode läßt sich in zwei Schritte unterteilen. Zunächst muß der Vektor der Gewichtungen der einzelnen Prozesse $\vec{p}$ nach Gleichung (2.3) aus der Matrixgleichung

$$A\vec{p} = \vec{\alpha}$$

bestimmt werden. In einem zweiten Schritt lassen sich aus diesem Vektor die gesuchten Umweltlasten $\vec{\beta}$ berechnen (Gleichung (2.4)):

$$\vec{\beta} = B\vec{p} = B A^{-1} \vec{\alpha}.$$

Mit Streuungen behaftet sind die Größen in A , B , $\vec{\alpha}$, gesucht sind die Standardabweichungen von $\vec{\beta}$. Um die Fehlerfortpflanzung durchführen zu können, werden die Größen $\frac{\partial \beta_k}{\partial a_{ij}}$, $\frac{\partial \beta_k}{\partial b_{ij}}$, $\frac{\partial \beta_k}{\partial \alpha_j}$ benötigt. Diese partiellen Ableitungen lassen sich nach [13] angeben:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \beta_k}{\partial a_{ij}} &= \frac{(-1)^{i+j} \det(A_{ij})}{\det(A)} \beta_k + \frac{(-1)^{i+j}}{\det(A)} \sum_{l=1, l \neq j}^q (b_{kl} \det(A_{ij}^l)), \\ \frac{\partial \beta_k}{\partial b_{ij}} &= p_j \delta_{ki}, \\ \frac{\partial \beta_k}{\partial \alpha_i} &= \sum_{j=1}^q \frac{(-1)^{i+j} \det(A_{ij})}{\det(A)} b_{kj}. \end{aligned}$$

Dabei ist δ_{ij} das Kronecker-Symbol mit

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & i = j \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

und A_{ij} die Matrix A ohne i te Zeile und j te Spalte.

Damit sind alle Größen, die das Fehlerfortpflanzungsgesetz fordert, bereitgestellt, und die Standardabweichung bzw. Standardabweichung des Mittelwertes der Größen β_k lassen sich berechnen.

Allerdings muß dazu analog der Zuverlässigkeitsanalyse nach [13] die Determinante der Matrix A und aller Adjunkten berechnet werden. Wird die Matrixgleichung mittels der Cramerschen Regel gelöst, ist die Determinante von A in diesem Zusammenhang bereits berechnet worden. Erfolgte diese Berechnung auf Basis des Laplaceschen Entwicklungssatzes, sind auch die Adjunkten bereits berechnet worden. Wird die Matrixgleichung jedoch durch Invertieren der Matrix A beziehungsweise durch das Gaußsche Eliminationsverfahren gelöst, so fällt ein zusätzlicher Aufwand gleicher Größenordnung für das Berechnen der Determinanten an.

In diesem Fall kann man den Prozeßbaum anhand der Prozeßmatrix P rekonstruieren und die Fehlerfortpflanzung in Anlehnung an die sequentielle Methode vornehmen (s.u.). Dabei müssen lediglich die Streuparameter der Prozeßgewichtungen p_j berechnet werden. Letztlich läuft dies auf einen rekursiven Algorithmus mit einer Rekursionstiefe hinaus, die die Anzahl der Prozesse nicht übersteigt. Pro Rekursion muß eine Berechnung durchgeführt werden. Iterationen treten nicht auf, da die Gewichtungsfaktoren p_j bereits bekannt sind. Wenn die Eingangsgröße a_{ij} des Prozesses j als Ausgangsgröße a_{ik} aus dem Prozeß k stammt, gilt

$$p_k = \frac{a_{ij} \cdot p_i}{a_{ik}}. \quad (3.12)$$

Die prozeßspezifischen Daten werden jeweils für eine Massen- oder Energieeinheit des Hauptproduktes bestimmt, d.h. es gilt

$$p_k = a_{ij}p_i \quad \wedge \quad a_{ik} = 1.$$

Damit ergibt sich für die Fehlerfortpflanzung unter Vernachlässigung der Kovarianzen

$$\frac{s_{p_k}^2}{p_k^2} = \frac{s_{a_{ij}}^2}{a_{ij}^2} + \frac{s_{p_i}^2}{p_i^2}. \quad (3.13)$$

Ist Gleichung (3.12) nicht erfüllt, so wird das Prozeßprodukt a_{kj} auch von einem anderen Prozeß benötigt.⁴ In diesem Fall ist $\sigma_{p_k}^2/p_k^2$ um den in Gleichung (3.13) berechneten Wert zu erhöhen. Ist der Einfluß anderer Prozesse im obigen Sinne noch nicht vollständig berücksichtigt, ist die Rekursion abzubrechen und zum Prozeß i zurückzukehren. Dort wird nach weiteren Eingangsgrößen gesucht.

⁴In Anlehnung an [13] wird angenommen, daß durch geeignete Allokationen keine Kuppelprodukte auftreten. Näheres dazu findet sich in Kapitel 2.2.2.

Die Berechnung nach der *sequentiellen Methode* vollzieht sich nach Abschnitt 2.2.1 in vier Schritten:

1. Datenerfassung Prozesse
2. Gewichtung der Prozesse (Mengenmultiplikator) bestimmen
3. Prozesse gewichten (Bezug auf Referenzfluß herstellen)
4. Addition der gewichteten Prozeßdaten

Der größte potentielle Rechenaufwand muß für die zweite Phase aufgewandt werden, da dort gegebenenfalls Iterationen auftreten.

Wird eine statistische Fehlerabschätzung mit einbezogen, ändert sich der Ablauf wie folgt:

1. Datenerfassung Einzelprozeße, Standardabweichungen und Mittelwerte bestimmen
2. Gewichtung der Prozesse (Mengenmultiplikator) bestimmen
3. Standardabweichung der Gewichtungsfaktoren (Mengenmultiplikatoren) bestimmen
4. Prozesse gewichten (Bezug auf Referenzfluß herstellen),
Gewichtungsfaktoren mit ihren Standardabweichungen in Standardabweichungen der Prozeßdaten einfallen
5. Addition der gewichteten Prozeßdaten,
Berechnung der Standardabweichung der Summe

Der Begriff Standardabweichung steht dabei hier stellvertretend für die Standardabweichung der Einzeldaten oder die Standardabweichung des Mittelwertes, je nachdem, welche Größe betrachtet werden soll.

Parallel zur Berechnung der Gewichtungsfaktoren der Einzelprozesse aus der Fortpflanzung des Stoff- und Energiebedarfs entlang der internen Ströme, wie in Abschnitt 2.2.1 erläutert, erfolgt auch die Fortpflanzung der Standardabweichungen mittels Fehlerfortpflanzungsgesetz entlang der internen Ströme. Schritt 3 lehnt sich an Schritt 2 an, die aufwendige Gewichtung kann jedoch unabhängig durchgeführt werden. Die Fehlerfortpflanzung bleibt unberührt von eventuellen Iterationsprozessen.

Die angewandten Methoden in den einzelnen Schritten wird in den folgenden Abschnitten 3.2.1 bis 3.2.5 erläutert. In Abschnitt 3.2.6 wird die konkrete Vorgehensweise zusammenfassend dargestellt.

3.2.1 Fehlerfortpflanzung

Wie in Abschnitt 3.1 erläutert, gilt für eine abhängige Größe

$$y = f(\vec{x}),$$

$$\vec{x} = (x_1, \dots, x_n)$$

näherungsweise das Gaußsche Fehlerfortpflanzungsgesetz

$$s_y^2 = \sum_i \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \cdot s_{x_i}^2 + \sum_{i,j} \frac{\partial f}{\partial x_i} \cdot \frac{\partial f}{\partial x_j} s_{x_i x_j}, \quad (3.14)$$

s_{x_i} : Standardabweichung bzw.

Standardabweichung des Mittelwertes,

$s_{x_i x_j}$: Kovarianzen.

Da die Zusammenhänge innerhalb einer Prozeßkette in der Regel linear sind oder als solche angenähert werden, treten weitgehend nur zwei Fälle auf oder lassen sich auf diese zurückführen:

$$y = \sum_i a_i x_i, \quad (3.15)$$

$$\Rightarrow s_y^2 = \sum_i a_i^2 s_{x_i}^2 + \sum_{i,j} a_i a_j s_{x_i x_j}, \quad (3.16)$$

$$a_i := \text{const.},$$

sowie

$$y = \prod_i a_i x_i, \quad (3.17)$$

$$\Rightarrow s_y^2 = \sum_i \prod_{j \neq i} a_j^2 x_j^2 s_{x_i}^2 + \sum_i \sum_j \prod_{k \neq i} a_k x_k \prod_{l \neq j} a_l x_l s_{x_i x_j}, \quad (3.18)$$

$$a_i := \text{const.}$$

Da die Einzelprozesse der Prozeßkette voneinander unabhängig sind, gilt bis auf speziell diskutierte Fälle (siehe Abschnitt 3.2.4)

$$s_{x_i x_j} = 0.$$

Damit vereinfachen sich die Gleichungen (3.15) bis (3.18) zu

$$\begin{aligned} y &= \sum_i a_i x_i \\ \Rightarrow s_y^2 &= \sum_i a_i^2 s_{x_i}^2 \end{aligned} \quad (3.19)$$

und

$$\begin{aligned} y &= \prod_i a_i x_i \\ \Rightarrow s_y^2 &= \sum_i a_i^2 \prod_{j \neq i} a_j^2 x_j^2 s_{x_i}^2 \\ \Rightarrow \frac{s_y^2}{y^2} &= \sum \frac{s_{x_i}^2}{x_i^2} \quad \text{mit } x_i^2 \neq 0 \wedge y^2 \neq 0. \end{aligned} \quad (3.20)$$

Eine wichtige Anwendung des Fehlerfortpflanzungsgesetzes in der Sachbilanzierung stellt die Bestimmung der Standardabweichung bei der Wichtung der Prozesse dar. Der Wichtungsfaktor des i ten Prozesses $\bar{g}_i$ berechnet sich sukzessive aus n Prozessen die über interne Ströme mit dem Hauptprodukt von Prozeß i verknüpft sind. Haben diese n Prozesse

das Gewicht $\bar{g}_j$ $j \in \{1..n\}$ mit der Streuung s_{g_j} $j \in \{1..n\}$ und dem ungewichteten Bedarf $\bar{x}_j$ $j \in \{1..n\}$ des Hauptproduktes des Prozesses i mit der Streuung s_{x_j} $j \in \{1..n\}$, so ergibt sich die Gewichtung $\bar{g}_i$ aus

$$\bar{g}_i = \sum_{j=1}^n \bar{g}_j \bar{x}_j.$$

Nach den Gleichungen (3.19) und (3.20) ergibt sich für die Streuung der Wichtung s_{g_i} :

$$s_{g_j}^2 = \sum_{j=1}^n \bar{g}_j^2 s_{x_i}^2 + \bar{x}_i^2 s_{g_i}^2. \quad (3.21)$$

Natürlich lassen sich beliebige differenzierbare Abhängigkeiten in analoger Weise nach Gleichung (3.14) erfassen. Dies kann allerdings zu Einschränkungen bei der Genauigkeit führen, da das Fehlerfortpflanzungsgesetz auf einer Näherung basiert, deren Güte auch vom zugrundeliegenden funktionalen Zusammenhang bestimmt wird (siehe Abschnitt 3.1).

3.2.2 Prozeßspezifische Mittelwerte

Am Anfang einer Prozeßkettenanalyse steht die Abbildung der Einzelprozesse. Hier werden Mittelwert und Streuungsmaß wie folgt ermittelt. Zunächst werden möglichst viele Daten zu stofflichen und energetischen Eingangs- und Ausgangsgrößen erhoben. Diese Daten sollten möglichst unabhängig voneinander sein, also aus unabhängigen Publikationen bzw. Messungen stammen. Der untersuchte Stand der Technik sollte bezüglich der Eingangs- und Ausgangsflüsse vergleichbar sein. Vergleichbar bedeutet, daß sich bei Verfahrensalternativen die 1s-Umgebungen der Mittelwerte überlappen. In diesem Fall überlagern sich zwei Normalverteilungen zu einer eingipfligen Gesamtverteilung.⁵

Der repräsentative Mittelwert wird dann als arithmetischer Mittelwert abgeschätzt oder – falls Gewichtungsfaktoren g_i bekannt sind (im allgemeinen Produktionsanteile oder Kapazitäten) – als gewichtetes Mittel

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \text{ bzw. } \bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n g_i x_i}{\sum_{i=1}^n g_i}. \quad (3.22)$$

Als Streuungsmaß läßt sich nun nach Abschnitt 3.1 die Standardabweichung s_x gemäß

$$s_x^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1} \text{ bzw. } s_x^2 = \frac{\sum_{i=1}^n g_i (x_i - \bar{x})^2}{\sum_{i=1}^n g_i} \quad (3.23)$$

oder die Standardabweichung des Mittelwertes m_x nach

$$m_x^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n - 1)} \text{ bzw. } m_x^2 = \frac{\sum_{i=1}^n g_i (x_i - \bar{x})^2}{(n - 1) \sum_{i=1}^n g_i} \quad (3.24)$$

⁵Ist diese Voraussetzung nicht erfüllt müssen die Verfahrensalternativen als Verzweigung in die Prozeßkette eingetragen und entsprechend behandelt werden.

berechnen.

Teilweise werden von den Quellen jedoch keine Einzeldaten, sondern Bereichsangaben zur Verfügung gestellt. Um die Datenbasis so breit wie möglich zu halten, erscheint es sinnvoll, auch solche Angaben dem Konzept zugänglich zu machen.

Wird ein Bereich $[x_u, x_o]$ ohne Mittelwert angegeben, so wird zunächst der Mittelwert durch das arithmetische Mittel der Bereichsgrenzen abgeschätzt:

$$\bar{x} = \frac{x_u + x_o}{2}.$$

Bei zusätzlicher Angabe eines Mittelwertes wird naheliegenderweise dieser verwendet. Um die Standardabweichung zu bestimmen, wird der größere Abstand des Mittelwertes zu den Bereichsgrenzen mit einer $2s$ -Umgebung abgedeckt:

$$2s_x = \max(|\bar{x} - x_u|, |\bar{x} - x_o|).$$

Dies stellt eine angemessene Abschätzung dar, da die beobachteten Werte in der Regel innerhalb einer $2s$ -Umgebung liegen. Eine Normalverteilung vorausgesetzt, beinhaltet ein $2s$ -Bereich um den Mittelwert ca. 95% aller Werte.

Während eine Bereichsangabe eine wertvolle Information für die Datenstreuung und damit die Standardabweichung darstellt, sagt sie sehr wenig über die Genauigkeit des angegebenen oder abgeschätzten Mittelwertes aus. Demzufolge wird die Standardabweichung des Mittelwertes analog zur obigen Überlegung konservativ zu

$$m_x = s_x$$

abgeschätzt.

Bei der Verknüpfung mit zusätzlichen Einzelwerten und Bereichsangaben ergibt sich für den Mittelwert der naheliegende Zusammenhang:

$$\bar{x} = \frac{1}{n_1 + n_2} (n_1 \bar{x}_1 + n_2 \bar{x}_2),$$

$$\begin{aligned} \bar{x}_1: & \text{Mittelwert aus Bereichsangabe,} \\ n_1 = & \begin{cases} 2 & \text{falls Bereichsangabe ohne Mittelwert,} \\ 3 & \text{falls Bereichsangabe mit Mittelwert,} \end{cases} \\ \bar{x}_2: & \text{Mittelwert aus Einzelwerten oder aus weiterer Bereichsangabe,} \\ n_2: & \text{Anzahl Einzelwerte oder analog zu } n_1. \end{aligned}$$

Um diese Werte nun auch mit den Streumaßen zusätzlicher Einzelwerte oder weiterer Bereichsangaben zu verknüpfen, wird vom Verschiebungssatz der Statistik für Momente zweiter Ordnung (siehe Abschnitt 3.1)

$$\sum_{i=1}^n (x_i - a)^2 = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 + n(\bar{x} - a)^2$$

ausgegangen. Dies führt zu:

$$(n_1 + n_2)(n_1 + n_2 - 1) s_x^2 = n_1(n_1 - 1) s_1^2 + n_2(n_2 - 1) s_2^2 + \frac{n_1 n_2}{n_1 + n_2} (\bar{x}_1 - \bar{x}_2)^2,$$

s_1 : Standardabweichung aus Bereichsangaben,
 s_2 : Standardabweichung aus Einzelwerten
 oder aus weiterer Bereichsangabe.

Damit ist eine Methode bereitgestellt, Mittelwerte und Standardabweichungen von beliebig vielen Bereichsangaben und Einzelwerten zunächst getrennt abzuschätzen und dann zusammenzuführen. Dieses Vorgehen entspricht in übertragenem Sinne der Vereinigung zweier Meßreihen, wie es beispielsweise in der Physik Anwendung findet [26].

In Einzelfällen kann es auch vorkommen, daß lediglich ein Einzelwert in einer Sachbilanzkategorie zur Verfügung steht. Aus einem Wert kann aus naheliegenden Gründen keine Streuung geschätzt werden, und die Gleichungen (3.23) und (3.24) werden singulär. Um auch diese Fälle handhaben zu können, wird ein Fehlerschätzparameter c_s eingeführt:

$$m_x = s_x = c_s x. \quad (3.25)$$

Für c_s wird dabei ein Wert von 50% gewählt. Ein Wert mit einer solchen Standardabweichung des Mittelwertes läßt sich nicht signifikant von Null unterscheiden, da diese innerhalb einer $2m$ -Umgebung liegt. Einen Abstand von $2m$ ist die allgemeine Mindestforderung für einen signifikanten Unterschied. Daher repräsentiert eine Standardabweichung des Mittelwertes von 50% die Information „Wert ist Anhaltswert“.

Nach Fertigstellung der Bilanz ist die Stabilität der Streumaße gegenüber dem Fehlerschätzparameter unbedingt durch dessen Variation zu überprüfen. Auch bei gegebener Stabilität der Streumaße stellen Fehler von 50% oder mehr nur die Information „Wert ist Anhaltswert“ bereit.

3.2.3 Einbezug von Teilprozeßketten

Insbesondere Sachbilanzen neueren Datums werden nur aggregiert bzw. teilaggregiert veröffentlicht (siehe z.B. [11, 31]). Diese Bilanzen können verschiedene Teile der Prozeßketten umfassen. Nun ist es natürlich wünschenswert, auch solche neuen und in der Regel recht vollständigen Angaben der Datenbasis hinzuzufügen.

Eingliedern läßt sich eine solche Teilprozeßkette nur dann, wenn ihre Bilanzgrenzen vollständig innerhalb derer der Hauptprozeßkette liegen.

Ist diese Voraussetzung erfüllt, läßt sich die Teilprozeßkette mit den Einzelprozessen der detaillierteren Prozeßkette nachbilden, wie in Abbildung 3.3 angedeutet. Man erhält für die einzelnen Stoff- und Energieströme an den Bilanzgrenzen der Teilprozeßkette:

$$\begin{aligned} \bar{x}_{PK}, s_{PK}, m_{PK}: & \text{ Mittelwert und Standardabweichungen} \\ & \text{ aus detaillierter Prozeßkette,} \\ \bar{x}_{TK}, s_{TK}, m_{TK}: & \text{ Mittelwert und Standardabweichungen} \\ & \text{ aus der Teilprozeßkette.} \end{aligned}$$

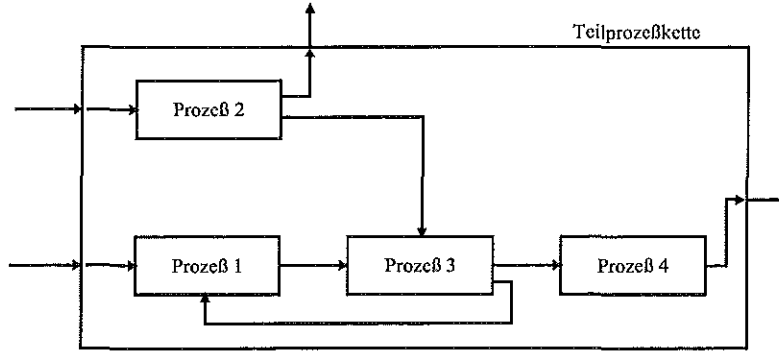


Abbildung 3.3: Teilkette in einer Prozesskette.

Der Gesamtmittelwert $\bar{x}$ berechnet sich dann gemäß

$$\bar{x} = \frac{g_{PK}\bar{x}_{PK} + g_{TK}\bar{x}_{TK}}{g_{PK} + g_{TK}},$$

g_{PK}, g_{TK} : Gewichte.

Nun stellt sich unmittelbar die Frage nach einer sinnvollen Gewichtung. Da die Prozeßmittelwerte mit dem arithmetischen Mittelwert bestimmt wurden, ist folgende Gewichtung naheliegend:

$$g_{PK} = n_{PK},$$

$$g_{TK} = n_{TK},$$

n_{PK} : Anzahl Einzeldaten in Prozessen,

n_{TK} : Anzahl Einzeldaten in Teilbilanz.

Dieser Ansatz setzt allerdings voraus, daß zu allen Einzelprozessen der Hauptprozesskette die gleiche Anzahl an Einzeldaten vorliegt. Dies ist aber im allgemeinen nicht der Fall, da ökonomisch und ökologisch relevante Prozesse häufiger untersucht werden.

Daher wurde eine Gewichtung mit dem mittleren Gewicht

$$g_{PK} = \bar{n}_{PK} = \sum_i n_{PK_i} \frac{x_{PK_i}}{\bar{x}_{PK}},$$

x_{PK_i} : Beitrag des Prozesses i ,

$\bar{x}_{PK}$: Gesamtwert der detaillierten Teilprozesskette

vorgenommen. Es geht also die Anzahl der Eingabedaten im jeweiligen Prozeß gewichtet mit dem relativen Beitrag zur betrachteten Teilprozesskette ein.

Gewichtungen auf der Basis von $n_{PK} = \max(n_{PK_i})$ oder $n_{PK} = \min(n_{PK_i})$ führen zu Verzerrungen, wenn große Beiträge der Einzelprozesse besonders gut oder besonders schlecht dokumentiert sind. Eine Gewichtung gemäß der Streuungsmaße $m_{TK}, m_{PK}, s_{TK}, s_{PK}$

erscheint nicht zweckmäßig. n_{TK} ist in der Regel klein, weil die Wahl der Systemgrenzen verschiedener Studien nur in seltenen Fällen übereinstimmt. Die Abschätzung für m_{TK} bzw. s_{TK} ist demzufolge eher unsicher. Diese Unsicherheit erschwert auch die Bestimmung der Streuungsmaße, wenn die Teilbilanzen berücksichtigt werden sollen. Zu dem Mittelwert $\bar{x}$ läßt sich ein „äußeres und inneres Streumaß“ s_{ext} bzw. s_{int} , wie in Abschnitt 3.1 diskutiert, bestimmen:

$$s_{\text{ext}}^2 = \frac{n_{TK}}{n_{TK} + \bar{n}_{PK} - 1} (x_{TK} - \bar{x})^2 + \frac{\bar{n}_{PK}}{n_{TK} + \bar{n}_{PK} - 1} (x_{PK} - \bar{x})^2, \quad (3.26)$$

$$s_{\text{int}}^2 = \left(\frac{n_{TK}}{n_{TK} + \bar{n}_{PK}} \right)^2 s_{PK}^2 + \left(\frac{\bar{n}_{PK}}{\bar{n}_{PK} + n_{TK}} \right)^2 s_{TK}^2 \quad (3.27)$$

und analog

$$m_{\text{ext}}^2 = \frac{n_{TK}}{(n_{TK} + \bar{n}_{PK})(n_{TK} + \bar{n}_{PK} - 1)} (x_{TK} - \bar{x})^2 + \frac{\bar{n}_{PK}}{(n_{TK} + \bar{n}_{PK})(n_{TK} + \bar{n}_{PK} - 1)} (x_{PK} - \bar{x})^2, \quad (3.28)$$

$$m_{\text{int}}^2 = \left(\frac{n_{TK}}{n_{TK} + \bar{n}_{PK}} \right)^2 m_{PK}^2 + \left(\frac{\bar{n}_{PK}}{\bar{n}_{PK} + n_{TK}} \right)^2 m_{TK}^2. \quad (3.29)$$

Dabei ist in einem konservativen Vorgehen – insbesondere bei der vorherrschenden kleinen Datenbasis – die größere dieser beiden Streuungen zu übernehmen.

Für den Fall $n_{TK} = 1$ tritt nun das Problem auf, daß m_{TK} und s_{TK} nicht bestimmt werden können. Damit kann keine Berechnung der inneren Streumaße erfolgen. Lediglich die äußeren Streumaße zu berücksichtigen, kann in diesem Fall leicht zu Fehlern führen, da nur über zwei Werte gemittelt wird. Wenn beispielsweise aus der Hauptprozeßkette bekannt ist, daß $\bar{x}_{PK}$ mit einer großen relativen Streuung $\frac{s_{PK}}{\bar{x}_{PK}}$ behaftet ist, kann ein Teilbilanzwert $x_{TK} \approx \bar{x}_{PK}$ zu einer Abschätzung von $\bar{x}$ mit kleiner relativer Streuung $\frac{s}{\bar{x}}$ führen, obwohl eine Vielzahl von Werten innerhalb der Hauptprozeßkette klar in eine andere Richtung weist.

Es wird also ein Ersatz benötigt für die inneren Streuungsmaße. Eine solche Größe läßt sich mit dem Verschiebungssatz der Statistik für Momente zweiter Ordnung (Gleichung (3.5)) konstruieren. Für den Fall $n_{TK} = 1$ erhält man die von s_{TK} bzw. m_{TK} unabhängige Beziehung:

$$n(n-1)s_x^2 = \bar{n}_{PK}(\bar{n}_{PK}-1)s_{PK}^2 + \bar{n}_{PK}(\bar{x}_{PK} - \bar{x})^2 + (x_{PK} - \bar{x})^2, \quad (3.30)$$

$$n = \bar{n}_{PK} + 1.$$

Dies läßt sich nun auch auf den Fall $n_{TK} > 1$ verallgemeinern. Man erhält:

$$\begin{aligned} n(n-1)s_x^2 &= \bar{n}_{PK}(\bar{n}_{PK}-1)s_{PK}^2 + n_{TK}(n_{TK}-1)s_{TK}^2 \\ &\quad + \frac{n_{PK}n_{TK}}{n} (\bar{x}_{PK} - \bar{x}_{TK})^2, \\ n &= \bar{n}_{PK} + n_{TK}. \end{aligned} \quad (3.31)$$

Bei den Berechnungen wurden nun im Fall $n_{TK} = 1$ die Streuungsmaße gemäß Gleichung (3.26) sowie gemäß Gleichung (3.30) berechnet, für den Fall $n > 1$ gemäß Gleichung (3.26), (3.27) und (3.31). Es wurde jeweils im Sinne einer konservativen Abschätzung der größte Wert übernommen. Dieses Vorgehen entspricht der Vereinigung zweier Meßreihen. Der Wert der Teilprozeßkette wird dem Datensatz gleichsam nachträglich hinzugefügt.

3.2.4 Kovarianzen

In das Fehlerfortpflanzungsgesetz gehen nach Abschnitt 3.1 auch Kovarianzen $s_{x_i x_j}$ gemäß Gleichung (3.14) ein. Die Kovarianz S_{xy} eines Meßwertpaares $(x_i$ und $y_i)$ läßt sich aus Einzeldaten schätzen zu [32]

$$s_{xy} = \frac{1}{n'} \sum_i (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}), \quad (3.32)$$

$n' = n - 1$ bei Berechnung der Standardabweichung,
 $n' = n(n - 1)$ bei Berechnung der Standardabweichung des Mittelwertes.

Auf diese Weise läßt sich eine Kovarianzmatrix bestimmen, deren Rang der gesamten Anzahl betrachteter Stoff- und Energieflüsse entspricht. Zum einen ist die Matrix aufgrund ihres sehr hohen Ranges schwer zu handhaben, zum anderen erfordert die zuverlässige Schätzung der Kovarianzen eine gute Statistik [32]. Es ist daher sinnvoll (und üblich), für offensichtlich unkorrelierte Größen Kovarianzen zu $s_{xy} = 0$ zu setzen. Für unkorrelierte Größen gilt dies exakt.

Korrelationen, die die Berechnung von Kovarianzen erfordern, entstehen in einer Prozeßkette immer dann, wenn sich Stoff- bzw. Energieflüsse gleicher Funktion verzweigen und sich wieder zu einem Fluß vereinigen oder, bei Erweiterung des Konzeptes bis in die Wirkungsabschätzung hinein, der gleichen Wirkungskategorie angehören. Abbildung 3.4a verdeutlicht dies. Stoff- und Energieflüsse gleicher Funktion genügen im Rahmen der Prozeßkette ganz oder teilweise der gleichen Anwendung und lassen sich in der Regel zu einem funktionellen Strom zusammenfassen, wie beispielsweise Energieträger zu einem

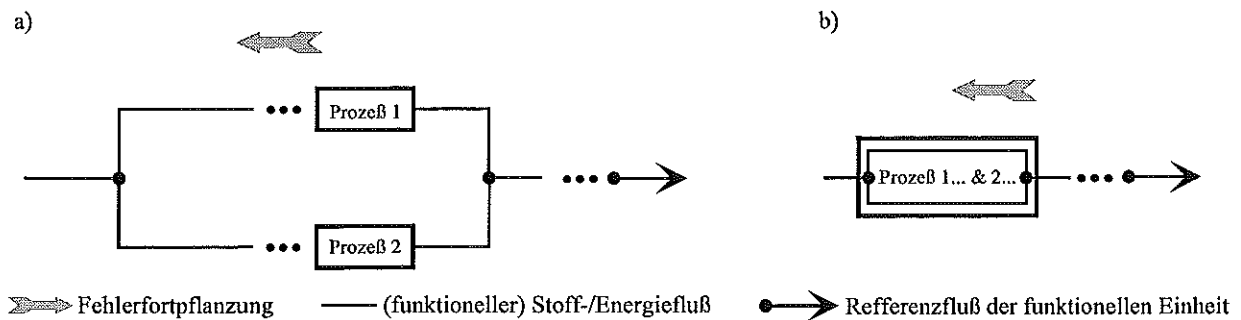


Abbildung 3.4: Kovarianzerzeugende Kopplung eines Stoff- oder Energieflusses in Prozeßketten (a) und Konstruktion eines Ersatzprozesses.

Tabelle 3.2: Symbolischer Datensatz für Beispielrechnung. Alle Angaben sind in MJ pro kg Prozeßprodukt.

[MJ/kg]	$\bar{x}$	m	1	2	3	4
Öl	$0,54 \pm 0,31$		0	1,10	0	1,05
Gas	$0,51 \pm 0,30$		1,00	0	1,05	0
E _{therm}	$1,05 \pm 0,02$		1	1,10	1,05	1,05

Energiestrom, leicht oxidierbare Stoffe⁶ zum Stoffstrom Reduktionsmittel oder ähnliches. Kovarianzen müssen unter Umständen auch zwischen den Flüssen verschiedener Prozesse beachtet werden wenn diese der gleichen Funktion dienen, also beispielsweise ein Reduktionsmittel wahlweise in zwei verschiedenen Prozessen zugegeben werden kann. Falls Recyclingkreisläufe auftreten, müssen Kovarianzen nur berechnet werden wenn der Referenzfluß der funktionellen Einheit außerhalb des Kreislaufs liegt.

Diese Topologie der Prozeßkette findet sich typischerweise bei Energieströmen, die sich zu einer gemeinsamen Emission vereinigen. Zur Bereitstellung von Prozeßwärme beispielsweise ist es in der Regel verfahrenstechnisch unbedeutend, ob dies mittels einer Gas- oder Ölfeuerung geschieht. Dies führt dazu, daß bei der Bilanzierung – gleichwertige Wirtschaftlichkeit vorausgesetzt – etwa gleich häufig Öl- und Gasverbräuche angetroffen werden. Daraus folgt, daß bei den Verzweigungsfaktoren große Fehler auftreten, auch wenn der thermische Energieeinsatz etwa gleich ist.

Läßt man die vorgelagerten Prozesse der Bereitstellung von Gas und Öl außer acht, gilt für die CO₂-Emissionsfaktoren der Feuerung nach [33]:

$$\begin{aligned} e_{\text{Öl}} &= 0,077 \text{ kg/MJ}_{\text{in}} \quad (\text{schweres Heizöl}) \\ e_{\text{Gas}} &= 0,055 \text{ kg/MJ}_{\text{in}} \quad (\text{Erdgas}) \end{aligned}$$

Im folgenden soll die Bedeutung von Kovarianzen anhand einer symbolischen⁷ Beispielrechnung mit Daten gemäß Tabelle 3.2 betrachtet werden.

Ohne Berücksichtigung der Kovarianzen ergibt sich aus

$$\bar{E}_{\text{Öl}} = (0,54 \pm 0,31) \text{ MJ},$$

$$\bar{E}_{\text{Gas}} = (0,51 \pm 0,30) \text{ MJ}$$

mit obigen Emissionsfaktoren eine CO₂-Emission von

$$\bar{m}_{\text{CO}_2} = (0,070 \pm 0,029) \text{ kg}$$

bezogen auf 1 kg Prozeßprodukt. Rechnet man stattdessen die CO₂-Emissionen aus den Einzeldaten getrennt aus und mittelt erst dann, so erhält man

⁶Sofern sie für denselben Reduktionsvorgang eingesetzt werden.

⁷Die verwendeten Daten dienen Demonstrationszwecken und sind keinem Beispielprozeß entnommen.

$$\begin{aligned}
m_1 &= 0,055 \text{ kg CO}_2 \\
m_2 &= 0,085 \text{ kg CO}_2 \\
m_3 &= 0,058 \text{ kg CO}_2 \\
m_4 &= 0,081 \text{ kg CO}_2
\end{aligned}$$

$$\Rightarrow \bar{m}_{\text{CO}_2} = (0,070 \pm 0,008) \text{ kg} \quad (3.33)$$

Bezüglich der Standardabweichung des Mittelwertes liegen die Ergebnisse um einen Faktor 3,5 auseinander. Dabei ist Resultat (3.33) das plausiblere, da im Vergleich zu obigem Vorgehen die Information, daß entweder nur Öl oder nur Gas eingesetzt wird, also die Korrelation zwischen Öl- und Gasbedarf, bis zur Mittelung und Fehlerabschätzung erhalten bleibt.

Eine andere Möglichkeit, diese Information zu transportieren, besteht in der Berücksichtigung von Kovarianzen. Aus dem Zusammenhang

$$e_{\text{tot}} = e_1 E_1 + e_2 E_2,$$

$$\begin{aligned}
e_{\text{tot}}: & \text{ Gesamtemission,} \\
e_1: & \text{ Emissionsfaktor von Energieträger } E_1, \\
e_2: & \text{ Emissionsfaktor von Energieträger } E_2
\end{aligned}$$

ergibt sich nach Fehlerfortpflanzungsgesetz

$$\begin{aligned}
s_{e_{\text{tot}}}^2 &= \sum_{i=1}^2 \left(E_i^2 s_{e_i}^2 + e_i^2 s_{E_i}^2 \right) \\
&\quad + 2E_1 e_1 s_{E_1 e_1} + 2e_2 E_2 s_{E_2 e_2} \\
&\quad + 2e_1 e_2 s_{E_1 E_2} \\
&\quad + 2E_1 E_2 s_{e_1 e_2}.
\end{aligned}$$

Dieses Gleichungssystem läßt sich unmittelbar auf n Energieträger verallgemeinern:

$$\begin{aligned}
s_{e_{\text{tot}}}^2 &= \sum_{i=1}^n E_i^2 s_{e_i}^2 \\
&\quad + \sum_{i=1}^n e_i^2 s_{E_i}^2 \\
&\quad + 2 \sum_{i=1}^n E_i e_i s_{E_i e_i} \\
&\quad + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n e_i e_j s_{E_i E_j} \\
&\quad + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n E_i E_j s_{e_i e_j}.
\end{aligned} \quad (3.34)$$

Der dritte Term in (3.34) trägt dabei einem Zusammenhang zwischen der Höhe des Energiebedarfs eines bestimmten Energieträgers und seinen Emissionsfaktoren Rechnung. Da

die Emissionsfaktoren per constructionem von der Höhe des Energiebedarfs unabhängig sind, gilt:

$$s_{E_i \epsilon_i} = 0.$$

Der vierte Term trägt den Substitutionsmöglichkeiten zwischen den verschiedenen Energieträgern Rechnung. Im betrachteten Beispiel zieht ein im Mittel verringerter Gaseinsatz einen erhöhten Einsatz an Öl nach sich. Prinzipiell gilt hier die Erhaltung der Energie

$$\sum_i E_i + E_{\text{Verlust}} = E_{\text{tot}} = \text{const} \quad (3.35)$$

als Randbedingung. Die Höhe der Verlustenergie ist beim Einsatz fossiler Brennstoffe im groben unabhängig von der Zusammensetzung der Energieträger, und somit gilt überschlägig für den thermischen Energieeinsatz E_{therm} :

$$E_{\text{therm}} := \sum_i E_i \approx \text{const}, \quad (3.36)$$

E_i : Energie aus Verbrennung des fossilen Energieträgers i .

Angesichts der Unterschiede in den Feuerungswirkungsgraden von etwa 5 bis 10 Prozentpunkten gilt die Erhaltung des thermischen Energiebedarfs nur grob. Dies reicht jedoch aus, eine starke Korrelation und damit relevante Kovarianzen zu erzeugen. In der Fallstudie wird der Beitrag des dritten Terms von Gleichung (3.34) gemäß Gleichung (3.32) berechnet, sofern mindestens zwei Datensätze über den Energieträgerbedarf vorliegen. Gleichung (3.36) kann man sich bei der Behandlung unvollständiger Datensätze, bei denen etwa nur der thermische Energieeinsatz, aber nicht die Aufschlüsselung nach Energieträgern angegeben werden, zunutze machen. Näheres dazu findet sich in Abschnitt 3.2.5. Der letzte Term beschreibt den Zusammenhang zwischen der Streuung der Emissionsfaktoren verschiedener Energieträger. Da diese allein von der jeweiligen Brennstoffqualität abhängig sind, gilt auch hier die Unabhängigkeit, also

$$s_{\epsilon_i \epsilon_j} = 0.$$

Für den betrachteten Fall vereinfacht sich Gleichung (3.34):

$$s_{\epsilon_{\text{tot}}}^2 = \sum_{i=1}^n \left(E_i^2 s_{\epsilon_i}^2 + \epsilon_i^2 s_{E_i}^2 \right) + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \epsilon_i \epsilon_j s_{E_i E_j}. \quad (3.37)$$

Für die Beispielrechnung ergibt sich gemäß Gleichung (3.32) mit den Werten aus Tabelle 3.2:

$$\begin{aligned} 2\epsilon_{\text{Öl}} \epsilon_{\text{Gas}} s_{E_{\text{Gas}}} s_{E_{\text{Öl}}} &= 2 \cdot 0,055 \cdot 0,077 \cdot (-0,092) \\ \Rightarrow \bar{m}_{\text{CO}_2} &= (0,070 \pm 0,008) \text{ kg CO}_2 \end{aligned}$$

in Übereinstimmung mit dem Resultat (3.33).

Abschließend bleibt festzustellen, daß Kovarianzen bei Kopplungen gemäß Abbildung 3.4 a) berücksichtigt werden müssen, jedoch durch Konstruktion eines Ersatzprozesses nach Abbildung 3.4 b) umgangen werden können, wie bei Berechnung von (3.33) erfolgt.

3.2.5 Thermischer Energieeinsatz

Der Energie fällt in einer Sachbilanz eine Schlüsselrolle zu. Zum einen trägt sie durch den Verbrauch an Energieträgern stark zum Ressourcenverzehr bei, zum anderen sind die Emissionen maßgeblich mit der Verbrennung fossiler Energieträger verknüpft. Häufig finden sich jedoch Quellen, die den Bedarf an Energieträgern zur Bereitstellung von Prozeßwärme nur durch „Brennstoffe“ oder ähnliches beschreiben bzw. den thermischen Energieeinsatz angeben. Letzteres ist vor allem der Fall, wenn die Bestimmung des kumulierten Energieaufwandes Ziel der Datenquelle ist.

Desweiteren kommt es vor, daß der Energieträgereinsatz nur teilweise dokumentiert ist, etwa, wenn einer der Energieträger dominiert. Dies gilt beispielsweise beim Kokseinsatz im Hochofen oder der elektrischen Energie in der Schmelzflußelektrolyse zur Erzeugung von Primäraluminium. Diese unvollständigen Datensätze stellen in solchen Fällen mit der Beschreibung eines dominanten Anteils immer noch eine wichtige Information bereit.

Die Kenntnis des Energieträger-Mixes ist aber zur Bestimmung der Emissionen relevant (siehe dazu auch Abschnitt 3.2.4). Liegen die CO_2 -Emissionsfaktoren verschiedener Energieträger noch innerhalb eines Faktors 2 zusammen, wie Tabelle 3.3 zu entnehmen ist, so differieren die SO_2 -Emissionen bereits um zwei Größenordnungen. (Die Ableitung der Werte wird in Abschnitt 4.2.5 diskutiert.)

Andererseits gibt es durchaus Prozesse, bei denen der dominante bzw. aggregierte thermische Energieeinsatz gut dokumentiert ist, die Aufschlüsselung der Energieträger hingegen nur schwach. Damit stellt sich die Frage, wie solche Daten in das Konzept eingebunden werden können.

Auf der Hand liegt, zunächst einmal die Summe der mittleren Energieträgereinsätze so zu skalieren, daß sie dem mittleren thermischen Energieeinsatz entspricht. Damit wird sichergestellt, daß die Angabe zu Energiebedarf und Emissionen zusammenpassen.

Datensätze, die nur Angaben über dominante Energieträger machen, lassen sich ohne große Fehler aus den vollständigen Datensätzen ergänzen, um den thermischen Energieeinsatz angeben zu können. Dies ist jedoch bei jedem Prozeß zu dokumentieren.

Dann werden die mittleren Energieträgereinsätze aus den vollständigen Datensätzen berechnet, weil nur für diese später die Kovarianzen bei der Berechnung der Emissionen berücksichtigt werden können. Nun wird der mittlere thermische Energieeinsatz $\bar{E}_{\text{therm}}$ berechnet. Dabei werden neben den vollständigen auch ergänzte Datensätze und Quellen, die nur den gesamten Brennstoffeinsatz nennen, berücksichtigt. Unter Berufung auf Gleichung (3.36) werden die einzelnen mittleren fossilen Energieträger $\bar{E}_i$ mit dem Faktor

$$c := \frac{\bar{E}_{\text{therm}}}{\sum_i \bar{E}_i}$$

skaliert.⁸ Aus diesem skalierten Energieträgerbedarf werden mittels Emissionsfaktoren unter Berücksichtigung der Kovarianzen die Emissionen berechnet.

Stehen keine vollständigen Datensätze zur Verfügung, können die Kovarianzen nicht

⁸Werden bei einem Teil der Datensätze fossile Energieträger durch Elektrizität ersetzt, müssen diese Datensätze getrennt skaliert werden.

Tabelle 3.3: Emission in [kg] für Endenergieeinsatz in [MJ], bezogen auf unteren Heizwert. Förderung und Bereitstellung sind eingeschlossen.

kg/MJ	Steinkohle	Erdgas	Heizöl S	Heizöl EL
CO ₂	$9,8 \cdot 10^{-2}$	$6,4 \cdot 10^{-2}$	$9,65 \cdot 10^{-2}$	$8,5 \cdot 10^{-2}$
SO ₂	$5,6 \cdot 10^{-4}$	$4,0 \cdot 10^{-5}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-4}$

berücksichtigt werden. Um die Streuung so konservativ wie möglich abzuschätzen, werden die Emissionen in diesem Falle auf zwei verschiedene Weisen berechnet:

1. Die Emissionen werden unter Einbezug der unvollständigen Daten berechnet.
2. Es wird ein mittlerer Emissionsfaktor für den thermischen Energieeinsatz bestimmt. Dabei geht der mittlere Bedarf $\overline{E}_i$ des Energieträgers als Gewichtung ein:

$$g_i = \overline{E}_i,$$

sofern $\overline{E}_i$ mehr als nur ein Anhaltswert ist (siehe Abschnitt 3.2.2), also

$$\frac{s_{E_i}}{\overline{E}_i} \leq 0,5 \quad \text{bzw.} \quad \frac{m_{E_i}}{\overline{E}_i} \leq 0,5.$$

Falls dies nicht erfüllt ist, wird gleichmäßig anhand der folgenden Summe gewichtet:

$$g_i = \frac{\sum E'_j}{\sum \overline{E}_j},$$

$$E'_j = \begin{cases} \overline{E}_j & \text{für } s_{\overline{E}_j}/\overline{E}_j \geq 0,5 \text{ oder } m_{\overline{E}_j}/\overline{E}_j \geq 0,5 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

Im Grenzfall, daß nur Anhaltswerte vorliegen, entspricht dies einer ungewichteten Mittelung.

Im Sinne einer konservativen Abschätzung wird der Wert mit der größten relativen Streuung akzeptiert. Es sei an dieser Stelle betont, daß Schritt 2 lediglich eine Hilfskonstruktion darstellt, die der schlechten Datenlage Rechnung tragen soll. Im Moment zeichnen sich jedoch durchaus Bestrebungen ab, die Datenlage zu verbessern. So hat die European Aluminium Association für Europa repräsentative Mittelwerte erhoben, die den in [11] veröffentlichten Daten zugrundeliegen. Die Daten sind jedoch vertraulich und dürfen nicht prozeßspezifisch veröffentlicht werden. Die Stahlindustrie faßt sogar eine weltweite Datenerhebung ins Auge [34]. Bei solchen Projekten können in Zukunft ohne großen Aufwand bei der Mittelung auch Informationen zu den Streuungen bestimmt werden. Da sich aus diesen zusätzlichen Angaben keine herstellereinspezifischen Angaben ableiten lassen, sollte einer aggregierten Veröffentlichung nichts im Wege stehen.

Da die meisten industriellen Prozesse endothermer Natur sind, müssen Nutzenergie (z.B.

Prozeßwärme) oder direkte Energieträger eingebracht werden.

Im letzteren Fall kann man die *prozeßspezifischen Emissionen* den eingebrachten Energieträgern in Form von Emissionsfaktoren zuordnen. Bei verschiedenen eingetragenen Energieträgern ist die jeweilige Zuordnung einzelner Emissionen im allgemeinen nicht eindeutig möglich, daher wird folgende vereinfachte Zuordnung angewandt:

$$e_i^j = \frac{X_{\text{Em}}^j E_i'}{\sum_k E_k'},$$

E_i' : Energieeinträge, denen Prozeßemissionen zugewiesen werden,

X_{Em}^j : prozeßspezifische Emission,

e_i^j : prozeßspezifischer Emissionsfaktor für Energieträger i und Emission j .

Werden die prozeßbedingten Emissionen keinem Energieträger zugewiesen, so werden sie unabhängig zu den energiebedingten Emissionen addiert.

3.2.6 Zusammenfassung der Vorgehensweise

Die Vorgehensweise wird im folgenden in einer Übersicht zusammengefaßt und im Anhang B am Beispiel der Primäraluminiumherstellung illustriert.

1. Für jeden Ein- und Austrag der Prozesse und Teilprozeßketten x_i wird ein Mittelwert $\bar{x}$ als arithmetisches oder gewichtetes Mittel bestimmt (Gleichung (3.22)).

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad \text{bzw.} \quad \bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n g_i x_i}{\sum_{i=1}^n g_i}.$$

2. Für jeden Mittelwert werden Standardabweichung s , Standardabweichung des Mittelwertes m und Kovarianzen s_{xy} berechnet. In der vorliegenden Fallstudie werden Kovarianzen der Energieträger sowie der Stoffflüsse, deren Kovarianzen nicht vernachlässigbar sind, berücksichtigt. Stoffflüsse, deren Kovarianzen Berücksichtigung finden, sind in Anhang C.1 und C.2 gekennzeichnet. Die Berechnung erfolgt nach den Gleichungen (3.23), (3.24) und (3.32):

$$s_x^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1} \quad \text{bzw.} \quad s_x^2 = \frac{\sum_{i=1}^n g_i (x_i - \bar{x})^2}{\sum_{i=1}^n g_i},$$

$$m_x^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)} \quad \text{bzw.} \quad m_x^2 = \frac{\sum_{i=1}^n g_i (x_i - \bar{x})^2}{(n-1) \sum_{i=1}^n g_i},$$

$$s_{xy} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}), \quad \text{bzw.} \quad s_{xy} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n g_i} \sum_{i=1}^n g_i (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}).$$

3. Nötigenfalls wird der Energieträgerbedarf wie in Abschnitt 3.2.5 erläutert an den gesamten thermischen Energiebedarf angepaßt.

4. Die energiebedingten Emissionen $\bar{e}_{tot}$ werden durch Multiplikation des Energieträgerbedarfs $\bar{E}_i$ mit den Emissionsfaktoren $\bar{e}_i$ nach dem Energiebereitstellungsmodell berechnet:

$$\bar{e}_{tot} = \sum_i \bar{e}_i \bar{E}_i.$$

Standardabweichung und Standardabweichung des Mittelwertes werden gemäß Gleichung (3.37) unter Berücksichtigung der Kovarianzen bestimmt:

$$s_{\bar{e}_{tot}}^2 = \sum_{i=1}^n \left(\bar{E}_i^2 s_{\bar{e}_i}^2 + \bar{e}_i^2 s_{\bar{E}_i}^2 \right) + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \bar{e}_i \bar{e}_j s_{E_i E_j}.$$

Die energiebedingten werden zu den prozeßbedingten Emissionen wiederum unter Beachtung der Kovarianzen hinzugefügt. Das gesamte Verfahren wird in Abschnitt 3.2.5 erläutert.

5. Berechnen der Gewichtung $\bar{g}_i$ der Einzelprozesse und der Teilprozeßketten mittels einer der in Abschnitt 2.2 vorgestellten Algorithmen. Dieser Fallstudie liegt die sequentielle Methode zugrunde.
6. Sukzessive Anwendung des Fehlerfortpflanzungsgesetzes von Prozeß i zu Prozeß j zur Berechnung von Standardabweichung und Standardabweichung des Mittelwertes der Wichtungen $\bar{g}_j$ gemäß Gleichung (3.21):

$$\begin{aligned} \bar{g}_j &= \bar{g}_i \bar{x}_i, \\ s_{g_j}^2 &= \bar{g}_i^2 s_{x_i}^2 + \bar{x}_i^2 s_{g_i}^2. \end{aligned}$$

7. Die Wichtung der mit dem Einzelprozeß j verknüpften verschiedenen Stoffströme $\bar{x}_i$ mit dem Prozeßgewicht $\bar{g}_j$

$$\bar{y}_i = \bar{g}_j \bar{x}_i$$

wird für alle Prozesse j durchgeführt. Standardabweichung und Standardabweichung des Mittelwertes werden mittels Fehlerfortpflanzungsgesetz berechnet, nach Gleichung (3.20):

$$s_{y_i}^2 = \bar{g}_j^2 s_{x_i}^2 + \bar{x}_i^2 s_{g_j}^2.$$

8. Teilprozeßketten werden wie in Abschnitt 3.2.3 beschrieben eingefaltet.
9. Die Beiträge der Einzelprozesse und Teilprozeßketten y_i werden zu Sachbilanzeinträgen $\bar{z}_i$ summiert. Standardabweichung und Standardabweichung des Mittelwertes der Summen werden gemäß dem Fehlerfortpflanzungsgesetz nach Gleichung (3.19) berechnet:

$$\begin{aligned} \bar{z}_i &= \sum_i \bar{y}_i, \\ s_{z_i}^2 &= \sum_i s_{y_i}^2. \end{aligned}$$

Kapitel 4

Fallstudie

In diesem Kapitel wird die Fallstudie vorgestellt, in deren Rahmen die in Abschnitt 3.2 bereitgestellte Methode erprobt wird. Es wird eine Sachbilanz erstellt zum Vergleich von Pkw-Rohkarosserien in konventioneller Stahlbauweise sowie in Leichtbauweise durch Einsatz höherfester Stahlbleche und „tailored blanks“¹ und als dritte Alternative in Form einer reinen Aluminiumkonstruktion.

Die Fallstudie dient zur Verifikation der Vorgehensweise. Die praktische Anwendbarkeit der statistischen Fehlerrechnung wird demonstriert. Auftretende Probleme bei der Anwendung statistischer Fehlerabschätzung wurden bereits in Abschnitt 3.2 diskutiert, da die Vorgehensweise in enger Wechselwirkung mit der Fallstudie entwickelt wurde. Die Größe der resultierenden Streumaße zeigt auf, ob die Ursachen der Streuungen differenziert genug analysiert werden können, um aussagekräftige Ergebnisse zu liefern. Einerseits dürfen die Auswirkungen der Datenstreuungen im Sinne einer konservativen Abschätzung nicht unterschätzt werden, andererseits sollten signifikante Unterschiede identifizierbar sein. Die Resultate der Fallstudie werden in Kapitel 5 analysiert.

In den folgenden Abschnitten werden, neben der Definition von Untersuchungsgegenständen und -ziel, die Prozeßketten zu Herstellung und Entsorgung beziehungsweise Recycling vorgestellt. Die zugrundeliegenden Einzelprozesse dieser Prozeßketten werden in den Abschnitten 4.2.1, 4.2.2 beziehungsweise 4.2.4 kurz charakterisiert. Neben der Angabe von Mittelwerten und Standardabweichungen der prozeßspezifischen Daten werden die analysierten Techniken beschrieben sowie gegebenenfalls Allokationsfragen aufgezeigt. Die Nutzungsphase läßt sich nicht in weitere Einzelprozesse zerlegen. Für dieses komplexe Modul erfolgt eine statistische Beschreibung in Abschnitt 4.2.3, die gut mit der statistischen Fehlerabschätzung innerhalb der Prozeßketten harmonisiert. Um den Aufwand zu begrenzen, mußten die Energiebereitstellung sowie das Transportmodul weitgehend aus anderen Quellen übernommen und mit einer vereinfachten Fehlerabschätzung versehen werden. Die genaue Vorgehensweise wird in den Abschnitten 4.2.5 und 4.2.6 diskutiert.

In der Fallstudie ändern sich durch den Austausch des Karosseriewerkstoffs die Umweltauswirkungen sowohl der Herstellungs- und Entsorgungs- als auch der Nutzungsphase.

¹Stahlbleche maßgeschneiderter Dicke.

Das Spannungsfeld dieses Vergleichs läßt sich durch eine energiebezogene Betrachtung andeuten. Dem höheren Primärenergiebedarf zur Herstellung einer Aluminiumkarosserie stehen Treibstoffeinsparungen aufgrund der reduzierten Masse des Fahrzeugs im Betrieb gegenüber. In welchen Sachbilanzkategorien sich letztlich signifikante Unterschiede zwischen den Karosserievarianten aufzeigen lassen wird in Kapitel 5 analysiert.

4.1 Zieldefinition

Die *Bilanzobjekte* sind Pkw-Rohkarosserien in konventioneller Stahlbauweise, in Stahl-Leichtbauweise sowie aus Aluminium. Unter einer Rohkarosserie wird dabei die gefügte unlackierte Karosserie als selbsttragende Blechkonstruktion inklusive Türen und Deckel ohne Karosserieausstattung verstanden. Es handelt sich damit um rein metallische Objekte.

Verglichen werden die Bilanzobjekte über ihren gesamten Lebensweg, jeweils getrennt für Kleinwagen, Mittelklasse und Oberklasse von Pkw mit Ottomotoren und geregelter Katalysator und für Mittel- und Oberklasse von Pkw mit Dieselmotor.

Anlehnend an das IKARUS²-Teilmodell für Verkehr wird die Einteilung in Klassen nach Hubraum wie folgt vorgenommen [35]:

Ottomotor:	$\leq 1500 \text{ cm}^3$	Kleinwagen
	$1500 \dots 2000 \text{ cm}^3$	Mittelklasse
	$> 2000 \text{ cm}^3$	Oberklasse
Dieselmotor	$< 2000 \text{ cm}^3$	Mittelklasse
	$> 2000 \text{ cm}^3$	Oberklasse

Für diese Einteilung werden aus [36] die mittleren Leergewichte und daraus in Anhang A die zugrundeliegenden Rohkarosseriemassen ermittelt. Das Resultat läßt sich Tabelle 4.1

Tabelle 4.1: Zugrundeliegende Rohkarosseriemassen und Gesamtlaufleistungen in den Fahrzeugklassen.

Antriebsart	Klasse	Masse Rohkarosserie	Gesamtlaufleistung
Otto	klein	270 kg	145 000 km
	mittel	310 kg	155 000 km
	ober	360 kg	170 000 km
Diesel	mittel	310 kg	225 000 km
	ober	360 kg	250 000 km

²„Instrumente für KlimAgas-RedUktions-Strategien“.

Mehraufwand zur Herstellung höherfester Stahlbleche sehr gering. Für die Aluminiumrohkarosserie wird eine reine Blechschalenkonstruktion unterstellt.

Die weiteren *Bilanzgrenzen* werden im folgenden festgelegt. Die Berücksichtigung von Transportvorgängen wird in Abschnitt 4.2.6 erläutert. Die Energiebereitstellung geht gemäß Abschnitt 4.2.5 ein. Die Bereitstellung von Legierungselementen, Produktionsmitteln und Straßen liegt außerhalb der Bilanzgrenzen. Herstellung und Montage von Ersatzteilen liefern nach [39] nur sehr geringe Beiträge und werden daher vernachlässigt. Die Treibstoffbereitstellung für die Nutzungsphase wird in die Betrachtung eingeschlossen. Geographisch wird Westeuropa als Bilanzraum für die Herstellung zugrunde gelegt. Unter Westeuropa wird dabei der UCPTE-Raum⁵ und Skandinavien verstanden. Nutzung und Entsorgung finden in Deutschland statt. Angesichts der europäischen Vernetzung von Automobil- und Werkstoffindustrie erscheint dies als angemessene Beschreibung eines in Deutschland erworbenen und genutzten Fahrzeugs.

Die Methode der Fehlerabschätzung erfordert den Einsatz möglichst vieler Einzeldaten. Ein relativ starkes Schwanken der zeitlichen Datenursprünge läßt sich daher nicht vermeiden. Schwerpunktartig stammen die Daten etwa aus dem Zeitraum 1989 bis 1995. Vereinzelt mußte aber auch auf deutlich ältere Daten zurückgegriffen werden.

Ein klares Abschneidekriterium, ab wann kleine Stoff- und Energieflüsse nicht mehr weiter verfolgt werden, läßt sich nicht angeben, da dies häufig durch die zur Verfügung stehenden Daten bestimmt wird. Die nicht weiterverfolgten Flüsse werden bei den Einzelprozessen in den folgenden Abschnitten dieses Kapitels diskutiert.

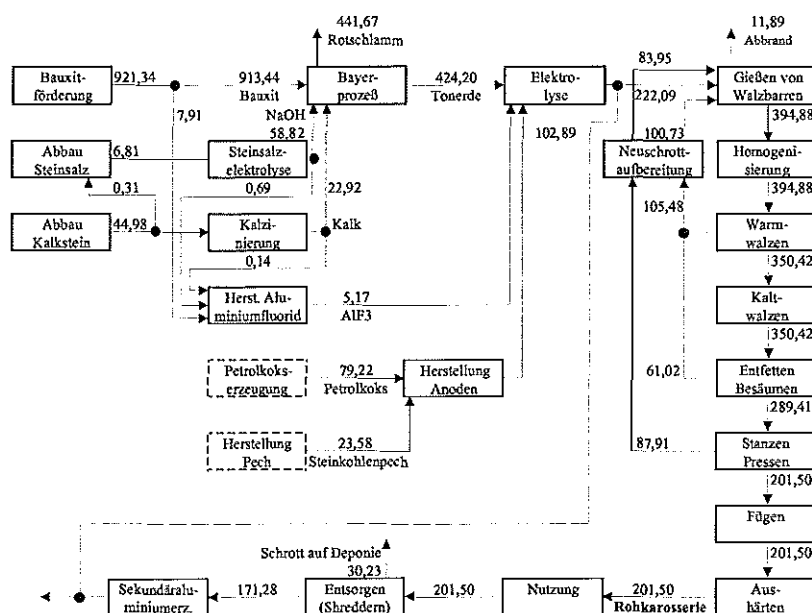


Abbildung 4.2: Prozeßkette einer Mittelklasse-Rohkarosserie aus Aluminium. Die eingetragenen Werte geben den Massenfluß in Kilogramm an. Gestrichelte Verknüpfungen werden in Kapitel 5 diskutiert, gestrichelt umrandete Prozesse nicht einbezogen.

⁵Belgien, Deutschland (alte Bundesländer), Dänemark, Frankreich, Großbritannien, Italien, Luxemburg, Niederlande, Portugal, Spanien, Schweiz.

4.2 Sachbilanz

4.2.1 Herstellung der Stahlrohkarosserie

Im folgenden wird nun auf die in Abbildung 4.1 dargestellten Einzelprozesse bis einschließlich dem Fügen kurz eingegangen. Der Ablauf der Prozesse wird grob beschrieben. Notwendige Vereinfachungen und Näherungen werden erläutert und begründet. Wenn möglich, wird abgeschätzt, inwieweit die Daten repräsentativ sind für den westeuropäischen Produktionsraum. Allokationsprobleme werden aufgezeigt und ihre als jeweils angemessenst erscheinende Handhabung dargelegt. Die Auswirkungen der Allokationen werden in Kapitel 5 diskutiert. Die stofflichen und energetischen Ein- und Ausgangsdaten der Prozesse finden sich zusammengefaßt am Ende dieses Abschnitts in Tabelle 4.2 bis Tabelle 4.3. Dort werden nur die Mittelwerte und Streuungsmaße wiedergegeben, da deren Ableitung jeweils nach den im Abschnitt 3.2 vorgestellten Methoden erfolgt. Die Einzelwerte und Quellen, aus denen die Prozeßdaten abgeleitet wurden, finden sich in Anhang C.1.

Die *Eisenerzförderung* findet vorwiegend im Tagebau statt [44]. Vom geförderten Roherz wird noch am Abbauort in Aufbereitungsanlagen der größte Teil der Gangart abgetrennt, um das Transportvolumen und damit die Kosten zu senken [45]. Das aufbereitete Erz wird gebrochen, gesiebt und nach Größenklassen sortiert. Die größte Stückgröße, das Stückerz, kann direkt im Hochofen eingesetzt werden, Fein- und Feinsterze werden entweder in den Sinteranlagen der Hüttenwerke oder in den Pelletieranlagen vor Ort für den Einsatz im Hochofen stückig gemacht. Der Beitrag der Erzförderung zur Gesamtprozeßkette ist von untergeordneter Bedeutung, abgesehen vom Roherzeinsatz. Die Daten für den Roherzeinsatz sind repräsentativ für Importe nach Deutschland. Aus der Darstellung der Welthandelsströme für Eisenerz nach [46] lassen sich diese auf europäische Verhältnisse übertragen. Gesicherte Aussagen über die Repräsentanz der übrigen Daten sind nicht möglich, sie werden ungewichtet gemittelt. Kuppelprodukte fallen nicht an, Allokationen sind daher nicht erforderlich.

Beim *Pelletieren* werden Feinsterze mit Korngrößen unterhalb von 2 mm eingesetzt. Der Einsatz im Sinterprozeß ist nicht möglich, da der geringe Durchmesser zu so hohen Schüttdichten führen würde, daß die notwendige Durchgasung nicht stattfinden könnte. Der Pelletierprozeß findet am Abbauort der Erze statt, da der Transport solcher Feinsterze Schwierigkeiten bereitet. Das Erz wird angefeuchtet und mit einem Bindemittel versehen zu Kugeln mit 10 bis 15 mm Durchmesser geformt. Diese Grünpellets werden getrocknet und anschließend bei mehr als 1000°C gebrannt [45]. Die Beiträge des Prozesses zur Prozeßkette sind gering. Es liegen keine Angaben vor, die eine Einschätzung der Repräsentanz erlauben. Die Bereitstellung des geringen Bedarfs an Bindemittel von ca. 10 g pro kg Pellets wird nicht in die Bilanz einbezogen. Der Bedarf an Kalk wird mit dem Modul Kalk-Kalzination verknüpft. Kuppelprodukte fallen nicht an.

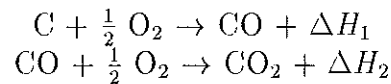
Das *Sintern* dient zum Stückigmachen von Feinerzen mit Korngrößen oberhalb von 2 mm.

Das Erz wird mit Koksgrus und Zuschlägen gemischt und auf einen umlaufenden Rost, das Sinterband, gegeben und von oben gezündet. Der enthaltene Kohlenstoff verbrennt mit Hilfe der durch den Rost angesaugten Luft. Die zusammengebackenen Erzkörner werden beim Umlenken des Rostes abgeworfen und grob gebrochen. Anfallende Feinanteile werden in den Sinterprozeß zurückgeführt [45]. Die Angaben zu Koksverbrauch und Stickoxidemissionen geben europäische Verhältnisse wieder. Mit dem Koksverbrauch ist damit auch der wesentliche Teil des Energiebedarfs repräsentativ erfaßt. Die CO₂-Emissionen werden aus dem Koksverbrauch berechnet. Weitere Angaben dazu finden sich im Anhang C.1. Das Sintern hat einen relevanten Anteil an den CO-Emissionen der Prozeßkette. Die Daten repräsentieren deutsche Verhältnisse. Es treten keine Kuppelprodukte auf.

Im *Hochofen* wird das Erz zu Eisen reduziert. Die dazu benötigten Reduktionsmittel bestehen zu einem großen Anteil aus Steinkohlenkoks. Der Koks dient auch als mechanische Stütze der Beschickungssäule und läßt sich daher nur begrenzt durch andere Reduktionsmittel wie Erdgas, Öl oder eingblasene feinkörnige Kohle ersetzen. Der Hochofen ist ein kontinuierlich arbeitender Schachtofen, der von oben beschickt wird. Die im Inneren ablaufenden Reaktionen sind in komplexer Weise miteinander verflochten und beeinflussen sich gegenseitig. Grob vereinfachend finden im wesentlichen zwei Prozesse statt: das Erz wird zu Eisen reduziert, und Kohlenstoff verbindet sich mit Eisen. Die Aufkohlung des Eisens bewirkt eine starke Herabsetzung des Schmelzpunktes, was die technische Gewinnung von Roheisen erst ermöglicht. Im abgestochenen flüssigen Roheisen verbleibt ein Anteil an gelöstem Kohlenstoff von etwa 4%. Die Reduktion des Eisenerzes findet unter Einsatz großer Mengen Luft und unter Bildung von Kohlenmonoxid und -dioxid statt. Die entstehenden Gase bilden das sogenannte Gichtgas und werden am abgedichteten Ofenkopf in einem Abzug erfaßt. Das Gichtgas wird entstaubt und steht danach als Brenngas zur Verfügung. Die im Hochofen benötigte Luft wird in Winderhitzern vorgeheizt. Die Winderhitzer werden mit Gichtgas, Koksofengas oder Erdgas betrieben [45]. Emissionen in die Luft resultieren daher einerseits aus der Verbrennung der Brenngase im Winderhitzer und andererseits aus Undichtigkeiten des Gichtgasabzuges. Tabelle 4.2 gibt die Emissionen aus beiden Quellen wieder. Die eingesetzten Energieträger werden daher nicht mit den in Abschnitt 4.2.5 diskutierten Verbrennungsmodulen verknüpft. Die Bereitstellung von Koks, Kohle und Koksofengas wird durch Verknüpfung mit den Prozessen Steinkohleförderung sowie Kokserzeugung berücksichtigt. Die Bereitstellung von Erdgas und schwerem Heizöl wird aufgrund der Geringfügigkeit vernachlässigt. Die Daten repräsentieren deutsche Verhältnisse. Nach Angaben in [47] läßt sich der Koksverbrauch durchaus auf Westeuropa verallgemeinern. Nach [34] gilt dies jedoch nicht für die Emissionen. Da für die europäische Situation keine Daten vorliegen, werden näherungsweise deutsche Werte verwendet.

Als Kuppelprodukt fällt beim Hochofenprozeß neben den Gichtgasen die Hochhofenschlacke an. Sie wird zum Straßen- und Wegebau verwendet und in Form von Hüttensand als Baustoff [48, 49]. Die anfallende Schlacke hat an der Gesamtmasse von Roheisen und Hochhofenschlacke einen Anteil von 25%. Eine Allokation in dieser Höhe wäre also prinzipiell denkbar. Da jedoch der Aufwand zur Bereitstellung von Baustoffen im allgemeinen

vergleichsweise gering ist, so beträgt der kumulierte Energieaufwand der Betonherstellung beispielsweise lediglich etwa 1,5 MJ/kg [50], werden keine Gutschriften aufgrund der Schlackeproduktion erteilt. Das Gichtgas transportiert das im Hochofen entstandene Kohlendioxid und -monoxid ab. Das Kohlendioxid wird dem Roheisen angelastet. Das aus dem Kohlenmonoxid bei Weiterverbrennung entstehende Kohlendioxid wird anteilig nach der Enthalpiefreisetzung bei den Reaktionen



allokiert. Dem Roheisen wird der Anteil $\Delta H_1/(\Delta H_1 + \Delta H_2)$ angelastet. Mit Werten nach [51] ergibt sich daraus eine Zuordnung von 28% des durch Verbrennung des Kohlenmonoxides im Gichtgas freiwerdenden Kohlendioxids. Da nach [52] Gichtgas etwa je zur Hälfte aus CO und CO₂ besteht, wird dem Roheisen insgesamt 78% des Kohlendioxids zugeordnet, welches bei vollständiger Verbrennung der Reduktionsmittel im Hochofen entstehen würde. Für das Gichtgas wird bei Berechnung des Gesamtenergiebedarfs eine Gutschrift gemäß des unteren Heizwertes erteilt. Dies gilt nur für Gichtgas, welches nicht innerhalb der Bilanzgrenzen verwertet wird.

Die *Steinkohleförderung* spielt in der Prozeßkette eine untergeordnete Rolle. Die Streuungen werden durch gewichtete Mittelung über Untertage- und Tageabbau abgeschätzt. Die Gewichtung spiegelt die europäische Situation unter Berücksichtigung der Importe wieder. Kuppelprodukte fallen nicht an.

Ein großer Teil der Ammoniakemissionen der Prozeßkette entstammt der *Kokserzeugung*. Die Emissionen geben den Stand in Nordrhein-Westfalen und damit in Deutschland wieder. Inwieweit dies repräsentativ für Europa ist, ist unbekannt. Auch hier müssen diese Werte mangels europäischer Daten zugrundegelegt werden. Schwefelarme Kohle wird unter Luftabschluß gebacken. Eine solche trockene Destillation dient zur Austreibung der flüchtigen Bestandteile Koksofengas, Teer, Benzol, Schwefelwasserstoff und Ammoniak. Diese flüchtigen Bestandteile werden aufgefangen und anderen Verwendungen zugeführt. Sie stellen also Kuppelprodukte dar, und es ergibt sich ein Allokationsproblem. In der Bilanz wird jedoch mit dem Koksofengas das bezüglich Masse und Energieinhalt eindeutig dominante Kuppelprodukt weiterverfolgt. Daher wird auf eine Allokation verzichtet und die gesamte Belastung dem Koks zugeschlagen. Bei der Berechnung des Energiebedarfs wird eine Gutschrift gemäß dem unteren Heizwert des Koksofengases gewährt. Die anderen Kuppelprodukte werden aufgrund ihres geringen Massenanteils vernachlässigt. Nach [33] kann dem Koks weitgehend unabhängig von Allokationsverfahren 80% des Prozesses angelastet werden. Dies wird in Kapitel 5 bei der Festlegung eines günstigen Szenarios wieder aufgegriffen.

Der *Kalksteinabbau* ist nur von sehr geringer Bedeutung für die Prozeßkette. Die schwache Datenbasis wirkt sich daher nur in vernachlässigbarer Weise aus. Es fallen keine Kuppelprodukte an.

Bei der *Kalzination von Kalkstein* (CaCO₃) zu Branntkalk (CaO) gast Kohlendioxid aus.

Aufgrund des vergleichsweise geringen Bedarfs an Kalk in der Prozeßkette reicht die Genauigkeit der Streuungsabschätzung für diese Emissionen aus stöchiometrischen Überlegungen aus. Genauer dazu findet sich im Anhang C.1. Kuppelprodukte treten nicht auf. Insgesamt ist der Prozeß von geringerer Relevanz für die Prozeßkette.

Im Stahlkonverter wird das Roheisen zu Stahl umgewandelt. Grob läßt sich der Ablauf in drei Teilprozesse unterteilen: Herabsetzung des Kohlenstoffgehaltes, Oxidation und Verschlackung unerwünschter Begleitelemente, sowie eine anschließende Desoxidation der Eisenoxide zu elementarem Eisen.

Im *Sauerstoffblaskonverter* wird die Verbrennung des Kohlenstoffs und der Begleitelemente durch Einblasen reinen Sauerstoffs in die Schmelze erreicht. Die Reaktionen laufen so heftig ab, daß mit der Zugabe von Schrott oder Erz gekühlt werden muß. Das Verbrennungsabgas enthält einen großen Anteil an Kohlenmonoxid. Es wird aufgefangen und steht als Konvertergas zur weiteren Verbrennung zur Verfügung. Zur Desoxidation wird meist Aluminium oder Silizium in die noch flüssige Schmelze gegeben, um mit dem gelösten Sauerstoff zu reagieren und in der Schlacke eingebunden zu werden [45]. Es entstehen Konvertergas und Stahlwerksschlacke als Kuppelprodukte. Stahlwerksschlacke kann beispielsweise im Straßen-, Gleis- oder Deichbau eingesetzt werden [48]. Emissionen in die Luft entstehen durch Undichtigkeiten beim Auffangen des Konvertergases. Bei den Kuppelprodukten Stahlwerksschlacke und Konvertergas ist die Situation ähnlich der Situation beim Hochofen mit den Kuppelprodukten Hochofenschlacke und Gichtgas. Demzufolge wird hier bei den Allokationen analog vorgegangen. Die Stahlwerksschlacke hat an der Gesamtmasse von entstehender Schlacke und Rohstahl einen Anteil von 10%. Eine Allokation in dieser Höhe wird in Kapitel 5 zur Konstruktion eines günstigen Szenarios herangezogen.

Das Vergießen des Stahls im Hüttenwerk findet in Europa zu über 90%, weltweit zu über 70%, in *Stranggußanlagen* statt [53]. Der Blockguß wird lediglich im Bereich der Erzeugung großer Schmiedeböcke weiter in Anwendung bleiben [45]. Beim Strangguß muß unterschieden werden zwischen dem konventionellen Brammenstrangguß sowie dem Dünnbrammen- und Dünnbandgießen. Der Unterschied besteht in der Dicke des Bandes, welches an das Warmwalzwerk abgegeben wird. Je dünner das Band, desto geringer der Aufwand beim Warmwalzen. Nach [54] sind die in Anwendung und Entwicklung befindlichen Gießverfahren zur Herstellung von Dünnbrammen oder Dünnband noch nicht für den großtechnischen Erzeugungsprozeß von Karosserieblech ausgereift. Für die Bilanz ist daher nur der konventionelle Strangguß von Belang. Der Prozeß ist, abgesehen von obiger Überlegung, von untergeordneter Bedeutung. Die Emissionen werden mit den entsprechenden Modulen in Abschnitt 4.2.5 erzeugt. Als Kuppelprodukt tritt lediglich Schrott auf, der innerhalb des Bilanzraumes verwendet wird.

Im *Warm-* und im *Kaltwalzwerk* findet nach der Urformung die Umformung des Stahls bei der Stahlblechherstellung statt. Dies geschieht in beiden Fällen durch Längswalzen. Das Warmwalzen findet bei hohen Temperaturen im sogenannten Warmumformungsbe-

reich statt. Der Kraftaufwand ist dabei geringer als beim Kaltumformen, da keine Verfestigung des Gefüges stattfindet [45]. Prozeßbedingte Emissionen sind nicht bekannt. Der Energieträgereinsatz findet innerhalb konventioneller Öfen statt, daher erfolgt eine Verknüpfung mit den Feuerungsmodellen nach Abschnitt 4.2.5. Als Kuppelprodukt tritt lediglich Schrott auf, der innerhalb der Bilanz im Blasstahlkonverter verwertet wird.

Im *Preßwerk* werden aus dem Feinblech Teile *ausgestanzt* und zur endgültigen Form tiefgezogen. Daten zu prozeßbedingten Emissionen, etwa aufgrund der eingesetzten Schmiermittel, liegen nicht vor. Sie dürften aber mengenmäßig sehr gering sein und werden daher vernachlässigt. Der Prozeß ist lediglich im Bereich des Schrottanfalls relevant für die Prozeßkette. Im Preßwerk fällt Verschnitt in der Größenordnung von 40 bis 45% an. In [55] wird vorgeschlagen, die Stanzreste als Kühlschrott im Stahlkonverter zu bilanzieren. Der Kühlschrotteinsatz ist jedoch auf 20 bis 25% begrenzt [56]. Dies hat qualitative und metallurgische Gründe. Zum einen ist der Einsatz von Fremdschrott aufgrund seiner Anteile an Begleit- und Spurenelementen begrenzt. Zum anderen ist aufgrund verstärkter Nachbehandlung das Roheisen physikalisch und chemisch deutlich kälter, was den Einsatz von Kühlschrott unabhängig von der Reinheit beschränkt. In der Bilanz beträgt der Kühlschrotteinsatz etwa 20%, was angesichts obiger Überlegungen und der hohen Qualitätsanforderungen an Karosseriebleche als realistisch erscheint. Damit lassen sich aber nicht die gesamten Stanzreste als Kühlschrott verwerten. Es ist jedoch naheliegend, für den hochwertigen Neuschrott eine Substitutionsgutschrift zu erteilen. Dies wird hier dadurch angenähert, daß der Neuschrott, der nicht im Stahlkonverter zum Einsatz kommen kann, im Elektrolichtbogenofen eingeschmolzen und beim Stranggießen in die Prozeßkette eingekoppelt wird. Dieses Vorgehen lehnt sich damit an [11] an. Dieser Weg ist technisch möglich wird aber derzeit nicht beschritten. Er ist im Sinne einer Substitutionsgutschrift zu verstehen.

Das verbreitetste Verfahren beim *Fügen* von Rohkarosserien ist das Widerstandspunktschweißen [57, 58]. Aus Mangel an Daten kann nur der Bedarf an elektrischer Energie bilanziert werden. Der Bedarf an thermischer Energie ist aber sehr gering, wie sich [39] entnehmen läßt. Prozeßbedingte Emissionen sind vernachlässigbar [59].

Die Teilprozeßkette „Blechverarbeitung“ umfaßt die Einzelprozesse „Strangguß“, „Warmwalzen“ und „Kaltwalzen“. Die Teilprozeßkette „Stahlblechherstellung“ umfaßt mit den zusätzlichen Prozessen „Kokserzeugung“, „Sintern“, „Hochofen“ und „Oxygenstahlerzeugung“ die typische Verarbeitungstiefe eines integrierten Hüttenwerkes.

Tabelle 4.2: Einzelprozeßdaten zur Herstellung von Pkw-Rohkarosserien aus Stahl. Emissionen der mit „p“ gekennzeichneten Energieeinträge sind prozeßspezifisch und in dieser Tabelle miterfaßt. Angegeben sind Mittelwert $\langle x \rangle$, Standardabweichung s , Standardabweichung des Mittelwertes m sowie Umfang der Datenbasis n . Alle Angaben beziehen sich auf ein Kilogramm Prozeßprodukt.

	Erzabbau				Pelletieren				Kalksteinabbau				Kalk-Kalkzinieren			
	$\langle x \rangle$	m	s	n	$\langle x \rangle$	m	s	n	$\langle x \rangle$	m	s	n	$\langle x \rangle$	m	s	n
Energieträger	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg		MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg		MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg		MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	
Strom UCPTE	-	-	-	0	-	-	-	0	6,30E-03	6,30E-03	8,91E-03	2	1,64E-01	3,52E-02	6,09E-02	3
Strom St.Ind. ¹⁾	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Strom int. ²⁾	1,50E-01	5,67E-02	1,50E-01	7	1,26E-01	1,93E-02	6,41E-02	11	-	-	-	0	-	-	-	0
Steinkohle	-	-	-	0	1,39E-01	9,27E-02	2,93E-01	10	2,77E-03	2,77E-03	3,92E-03	2	3,93E+00	1,17E+00	1,65E+00	2
Erdgas	-	-	-	0	1,84E-01	1,16E-01	3,65E-01	10	3,53E-03	3,53E-03	4,69E-03	2	1,02E+00	1,02E+00	1,44E+00	2
Heizöl S	-	-	-	0	3,22E-01	1,47E-01	4,64E-01	10	1,64E-03	1,64E-03	2,31E-03	2	3,82E-02	3,82E-02	5,40E-02	2
Heizöl EL	-	-	-	0	2,56E-02	2,56E-02	8,16E-02	10	7,32E-02	4,12E-02	5,83E-02	2	7,62E-02	7,62E-02	1,08E-01	2
Diesel	(p) 6,11E-02	(p) 1,72E-02	(p) 3,44E-02	4	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Koks	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Dampf ³⁾	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Oiebgas	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Koksgas	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Konvertergas	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
thermisch	6,11E-02	1,72E-02	3,44E-02	4	7,44E-01	1,45E-01	5,04E-01	12	8,12E-02	3,33E-02	4,70E-02	2	5,36E+00	4,71E-01	7,08E-01	4
Materialbedarf	kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg	
Bauxit	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Bentonit	-	-	-	0	1,01E-02	5,28E-03	1,06E-02	4	-	-	-	0	-	-	-	0
H2SO4	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Kalkstein	-	-	-	0	(n) 1,32E-02	(n) 7,18E-03	(n) 1,61E-02	5	-1,09E+00	0,00E+00	0,00E+00	1	1,93E+00	5,00E-02	7,07E-02	2
Legierungen	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Roborz	2,36E+00	3,35E-01	8,86E-01	8	-	-	-	-1	-	-	-	0	-	-	-	0
Sauerstoff	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Walzöl	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Robbenzol	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Robtaer	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Schlacke	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Em. in Luft	kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg	
C2F6	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
CF4	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
CH4	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
CO	9,00E-05	4,50E-05	4,50E-05	1	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
CO2	4,48E-03	1,28E-03	2,57E-03	4	-	-	-	0	-	-	-	0	8,00E-01	2,21E-02	4,21E-02	4
HCl	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
HF	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
N2O	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
NH3	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
NM VOC	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
NOx	3,42E-04	1,71E-04	1,71E-04	1	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
SO2	2,05E-05	1,42E-05	2,85E-05	4	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Staub	3,09E-03	2,91E-03	4,12E-03	2	7,67E-04	3,84E-04	3,84E-04	1	4,25E-02	2,95E-02	4,17E-02	2	1,80E-02	9,00E-03	9,00E-03	1

¹⁾ Strom stammt in Stahlindustrie aus eigenerzeugung, hier verknüpft mit Modul UCPTE. ²⁾ Teilweise aus energetischen Berechnungen, hier verknüpft mit Modul UCPTE.

	Statern				Hochofen				Stetigkohlendruck				Kokserzeugung			
	$\langle x \rangle$	m	s	n	$\langle x \rangle$	m	s	n	$\langle x \rangle$	m	s	n	$\langle x \rangle$	m	s	n
Energieträger	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg		MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg		MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg		MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	
Strom UCPTE	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Strom St.Ind. ¹⁾	9,31E-02	5,67E-03	2,66E-02	22	2,55E-01	3,16E-02	1,00E-01	10	-	-	-	0	1,34E-01	2,01E-02	4,49E-02	5
Strom int. ²⁾	-	-	-	0	-	-	-	0	2,45E-01	1,10E-01	1,10E-01	2	-	-	-	0
Steinkohle	-	-	-	0	2,10E+00	3,76E-01	1,88E+00	25	4,69E-01	7,61E+00	7,61E+00	2	3,50E+01	3,01E-01	7,95E-01	7
Erdgas	-	-	-	0	1,02E-01	5,01E-02	1,81E-01	13	-	-	-	0	1,07E-01	8,16E-02	1,82E-01	5
Heizöl S	4,00E-05	4,00E-05	1,79E-04	20	4,42E-01	2,09E-01	1,03E+00	24	9,14E-02	4,95E-02	4,95E-02	2	-	-	-	0
Heizöl EL	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Diesel	-	-	-	0	-	-	-	0	1,02E-01	1,41E-01	1,41E-01	2	-	-	-	0
Koks	1,38E+00	3,71E-02	2,35E-01	42	1,15E+01	3,33E-01	1,70E+00	26	-	-	-	0	2,86E+01	0,00E+00	0,00E+00	1
Dampf ³⁾	-	-	-	0	4,13E-02	2,78E-02	9,63E-02	12	-	-	-	0	-	-	-	0
Oiebgas	1,24E-02	9,05E-03	4,05E-02	20	4,22E+00	1,54E-01	9,48E-01	38	-	-	-	0	1,10E+00	5,90E-01	1,02E+00	3
Koksgas	1,50E-01	7,28E-02	3,25E-01	20	8,76E-01	3,12E-01	1,12E+00	13	-	-	-	0	2,34E+00	5,17E-01	8,96E-01	3
Konvertergas	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
thermisch	1,50E+00	6,72E-02	2,93E-01	19	1,15E+01	2,65E-01	9,54E-01	13	1,12E+00	2,80E-01	3,97E-01	2	7,07E+00	5,17E-01	8,96E-01	3
Materialbedarf	kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg	
Bauxit	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Bentonit	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
H2SO4	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Kalkstein	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Legierungen	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Roborz	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Sauerstoff	-	-	-	0	1,64E-02	1,19E-02	2,35E-02	4	-	-	-	0	-	-	-	0
Walzöl	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Robbenzol	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-1,12E-02	1,67E-03	3,72E-03	5
Robtaer	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-4,65E-02	3,25E-03	7,25E-03	5
Schlacke	-	-	-	0	-3,06E-01	2,49E-02	9,12E-02	15	-	-	-	0	-	-	-	0
Em. in Luft	kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg	
C2F6	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
CF4	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
CH4	1,80E-04	1,21E-04	1,70E-04	2	2,45E-06	5,38E-07	1,42E-06	7	1,11E-02	5,65E-03	5,65E-03	2	1,04E-04	4,13E-05	1,49E-04	13
CO	9,32E-03	4,80E-03	8,31E-03	3	1,97E-04	1,54E-04	4,36E-04	8	-	-	-	0	9,44E-04	3,65E-04	8,05E-04	7
CO2	1,52E-01	3,44E-03	2,15E-02	39	7,39E-01	1,06E-01	3,17E-01	9	-	-	-	0	6,95E-01	3,02E-02	7,99E-02	7
HCl	4,31E-05	2,17E-05	3,76E-05	3	8,69E-07	1,68E-07	4,11E-07	6	-	-	-	0	-	-	-	0
HF	7,41E-06	3,75E-06	6,50E-06	3	9,15E-08	1,77E-08	4,33E-08	6	-	-	-	0	1,00E-06	5,00E-07	5,00E-07	1
N2O	5,00E-06	2,50E-06	2,50E-06	1	1,01E-06	1,95E-07	4,78E-07	6	-	-	-	0	-	-	-	0
NH3	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1	1,97E-08	3,81E-09	9,33E-09	6	-	-	-	0	1,16E-04	7,51E-05	2,91E-04	15
NM VOC	7,95E-05	2,05E-05	2,90E-05	2	7,65E-06	1,39E-06	3,68E-06	7	-	-	-	0	3,50E-04	1,75E-04	1,75E-04	1
NOx	6,40E-04	6,44E-05	2,65E-04	17	2,04E-04	5,14E-05	1,45E-04	8	-	-	-	0	7,37E-04	8,24E-05	3,59E-04	19
SO2	1,34E-03	1,37E-04	2,73E-04	4	2,17E-04	8,28E-05	3,10E-04	14	-	-	-	0	5,65E-04	9,77E-05	4,37E-04	20
Staub	5,29E-04	1,14E-04	1,14E-04	2	1,12E-04	6,35E-05	2,47E-04	15	1,50E-04	8,66E-05	8,66E-05	2	2,69E-04	5,81E-05	2,72E-04	22

¹⁾ Verknüpft mit Feuerung Kohle, Brennstofffeuchtigkeitsgrad: 0,85. ²⁾ Auswahl externer Stofffröme.

Tabelle 4.3: Einzelprozeßdaten zur Herstellung von Pkw-Rohkarosserien aus Stahl. Emissionen der mit „p“ gekennzeichneten Energieeinträge sind prozeßspezifisch und in dieser Tabelle miterfaßt. Angegeben sind Mittelwert $\langle x \rangle$, Standardabweichung s , Standardabweichung des Mittelwertes m sowie Umfang der Datenbasis n . Alle Angaben beziehen sich auf ein Kilogramm Prozeßprodukt.

	Oppenstahlherzeugung				Strangguß				Warmwalzen				Kaltwalzen			
	$\langle x \rangle$	m	s	n	$\langle x \rangle$	m	s	n	$\langle x \rangle$	m	s	n	$\langle x \rangle$	m	s	n
Energieträger	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg		MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg		MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg		MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	
Strom UCPTE	1,04E-01	6,06E-03	1,60E-02	7	6,08E-02	1,39E-02	2,77E-02	4	2,85E-01	1,15E-02	2,30E-02	4	5,54E-01	6,75E-02	1,25E-01	4
Strom StInd. ¹⁾	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Strom int. ²⁾	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Steinkohle	4,67E-03	4,67E-03	8,08E-03	3	1,42E-01	7,12E-02	7,12E-02	1	3,64E-01	3,64E-01	5,14E-01	2	7,70E-01	3,93E-02	4,85E-02	3
Erdgas	1,22E-01	7,04E-02	1,22E-01	3	-	-	-	0	4,60E-01	4,60E-01	6,51E-01	2	2,84E-01	2,84E-01	4,91E-01	3
Heizöl S	1,10E-02	1,10E-02	1,91E-02	3	-	-	-	0	3,65E-01	3,65E-01	5,17E-01	2	-	-	-	0
Heizöl EL	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Diesel	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Koks	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Dampf ³⁾	1,60E-02	1,60E-02	2,77E-02	3	-	-	-	0	-	-	-	0	5,43E-01	2,82E-01	4,80E-01	3
Gichtgas	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Koksgas	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Koovertergas thermisch	-6,50E-01	1,53E-01	3,43E-01	5	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Koovertergas thermisch	-5,95E-01	2,22E-01	4,45E-01	4	1,16E-01	1,34E-02	2,32E-02	3	1,12E+00	1,19E-01	2,51E-01	5	1,42E+00	1,93E-01	3,68E-01	4
Materialbedarf	kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg	
Bauxit	1,06E-02	5,28E-03	5,28E-03	1	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Bentonit	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
H2SO4	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Kalkstein	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Legierungen	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Reberz	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Sauerstoff	8,40E-02	1,09E-02	2,44E-02	5	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Wärzöl	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	1,35E-03	4,40E-04	7,62E-04	3
Reibbenzol	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Reibseil	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Schlacke	-1,19E-01	1,09E-02	2,45E-02	6	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Em. in Luft	kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg	
CF4	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
CF4	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
CH4	1,00E-05	5,00E-06	5,00E-06	1	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
CO	1,13E-02	2,50E-04	3,54E-04	2	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
CO2	1,24E-01	2,79E-02	6,24E-02	5	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
HCl	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
HF	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
N2O	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
NH3	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
NM VOC	1,70E-04	8,50E-05	8,50E-05	1	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
NOx	8,00E-05	4,00E-05	4,00E-05	1	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
SO2	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Staub	1,48E-04	5,65E-05	5,78E-05	3	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0

	Pressen, Stanzen				Fügen einer Stahlkarosserie				TPK Stahlblechherzeugung ¹⁾			
	$\langle x \rangle$	m	s	n	$\langle x \rangle$	m	s	n	$\langle x \rangle$	m	s	n
Energieträger	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg		MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg		MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	
Strom UCPTE	8,89E-01	2,39E-01	4,72E-01	4	1,25E+00	4,37E-03	6,18E-03	2	6,31E-01	4,56E-02	6,49E-02	4
Strom StInd. ¹⁾	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Strom int. ²⁾	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Steinkohle	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Erdgas	-	-	-	0	-	-	-	0	1,50E+00	4,18E-01	5,91E-01	2
Heizöl S	-	-	-	0	-	-	-	0	8,70E-02	2,70E-02	3,82E-02	2
Heizöl EL	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Diesel	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Koks	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Dampf ³⁾	-	-	-	0	-	-	-	0	1,94E-01	2,90E-02	4,18E-02	2
Gichtgas	-	-	-	0	-	-	-	0	1,70E-01	1,70E-01	2,40E-01	2
Koksgas	-	-	-	0	-	-	-	0	5,48E-01	5,48E-01	7,74E-01	2
Koovertergas thermisch	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Koovertergas thermisch	-	-	-	0	-	-	-	0	2,50E+00	2,43E-01	3,44E-01	2
Materialbedarf	kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg	
Bauxit	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Bentonit	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
H2SO4	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Kalkstein	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Legierungen	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Reberz	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Sauerstoff	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Wärzöl	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Reibbenzol	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Reibseil	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Schlacke	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Em. in Luft	kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg	
CF4	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
CF4	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
CH4	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
CO	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
CO2	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
HCl	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
HF	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
N2O	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
NH3	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
NM VOC	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
NOx	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
SO2	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Staub	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0

¹⁾ Umfaßt die Einzelprozesse "Strangguß", "Warmwalzen" und "Kaltwalzen".

4.2.2 Herstellung der Aluminiumrohkarosserie

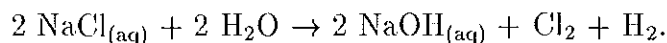
In diesem Abschnitt werden die Einzelprozesse der in Abbildung 4.2 dargestellten Prozeßkette erläutert. Wie im Abschnitt 4.2.1 werden die Prozeßabläufe grob beschrieben. Es werden Kuppelprodukte identifiziert und die damit verknüpften Allokationsprobleme aufgezeigt. Die Handhabung der Allokationen wird in Kapitel 5 diskutiert. Getroffene Vereinfachungen und Annahmen werden vorgestellt und begründet.

Mittelwerte und Streuungsmaße für die Eingangs- und Ausgangsgrößen der einzelnen Prozesse finden sich am Ende des Abschnitts in Tabelle 4.4 bis Tabelle 4.5. Die Ableitung dieser Werte aus den Einzelwerten der Literaturquellen findet sich im Anhang C.2.

Der *Bauxitabbau* findet im Tagebau statt [60]. Da die relativ großen Mengen an Abraum in der Bilanz nicht betrachtet werden, besitzt der Prozeß eine untergeordnete Bedeutung für die Prozeßkette. Gesicherte Aussagen, inwieweit die Daten repräsentativ sind, sind nicht möglich.

Das *Bayer-Verfahren* stellt das weitaus wichtigste und in der westlichen Welt einzige Verfahren zur Herstellung von Aluminiumoxid dar. Das im Bauxiterz enthaltene Aluminium wird dabei im Autoklaven oder Rohrreaktor unter Zugabe von 50%iger Natronlauge als Natriumaluminat in Lösung gebracht. Während des Abkühlens der Lösung scheidet sich Aluminiumhydroxid ab. Durch Kalzination in Drehrohr- oder Wirbelschichtöfen wird technisch reines Aluminiumoxid erzeugt. Die unlöslichen Reste des Erzes werden eingedickt und bilden den sogenannten Rotschlamm. Die Menge anfallenden Rotschlammes ist der Menge produzierter Tonerde vergleichbar [61]. Neben der Natronlauge wird auch Branntkalk zugegeben, um den aufschließbaren Aluminiumanteil des Bauxiterz zu erhöhen und den Verbrauch an Natronlauge zu senken [60]. In keiner der analysierten Quellen werden prozeßbedingte Emissionen ausgewiesen. Die Emissionen der Öfen werden daher mittels der entsprechenden Module zur Industriefeuerung gemäß Abschnitt 4.2.5 berechnet.

Die für das Bayer-Verfahren benötigte Natronlauge kann in verschiedenen Verfahren hergestellt werden. In der Bilanz konnte aufgrund von Datenmangel nur das Diaphragma-Verfahren zur *Natronlaugenherstellung* als eines von drei typischen Verfahren berücksichtigt werden. Die Verfahren unterscheiden sich nach [62] vor allem im Energieverbrauch. Das Membran-Verfahren liegt als energetisch günstigster Prozeß um etwa 25% niedriger als das Diaphragmaverfahren [62]. Die hier ermittelten Werte stellen daher eher eine Abschätzung nach oben dar. Die Natronlauge wird durch elektrolytische Zersetzung einer Natriumchloridlösung gewonnen:



Als Kuppelprodukte entstehen Chlor- und Wasserstoffgas, die beide außerhalb der Prozeßkette genutzt werden. Dadurch entsteht ein Allokationsproblem, das obige Abschätzung überwiegt. Hier werden die Allokationen gemäß eines Vorschlags von Boustead in [6] vorgenommen, dem auch in [11] Folge geleistet wird. Dabei werden der Bedarf an elektrischer

Energie und die Emissionen auf Basis der Produktmassen allokiert:

Natronlauge:	52,3%,
Chlorgas:	46,4%,
Wasserstoffgas:	1,3%.

Die Einsatzmenge an Natriumchlorid wird entsprechend den Atommassen von Natrium und Chlor aufgeteilt:

Natronlauge:	39,3%,
Chlorgas:	60,7%,
Wasserstoffgas:	0%.

Der Bedarf an thermischer Energie wird ausschließlich der Natronlauge angelastet. Das benötigte Steinsalz für die Elektrolyse wird durch Abbau gewonnen, dies ist hier in den Prozeß der Natronlaugenherstellung integriert.

Der benötigte Branntkalk wird über die bereits in Abschnitt 4.2.1 besprochenen Prozesse *Kalksteinabbau* und *Kalzinieren von Kalkstein* bereitgestellt.

Die *Schmelzflußelektrolyse nach Hall und Héroult* stellt den zweiten wichtigen Schritt zur Herstellung von Primäraluminium neben dem Bayer-Verfahren dar. In geschmolzenem Kryolith (Na_3AlF_6) werden etwa 2% bis 8% Aluminiumoxid gelöst [61]. In einer Schmelzflußelektrolyse wird die Tonerde zu elementarem Aluminium und gasförmigem Sauerstoff zersetzt. Der Sauerstoff reagiert mit der Kohlenstoffanode zu Kohlenmonoxid und -dioxid. Die benötigte Prozeßwärme fällt als Ohmsche Wärme und bei der Oxidation der Kohlenstoffanode an. Neben den Anoden wird noch Aluminiumfluorid (AlF_3) als Schmelzzusatz benötigt [61]. Der ermittelte Bedarf an elektrischer Energie ist repräsentativ für die weltweite Produktion mit Ausnahme von China. Ein Vergleich mit [11], worin vertrauliche Daten der European Aluminium Association verwendet wurden, zeigt, daß der Wert auch für europäische Verhältnisse repräsentativ ist. Auch die Angaben über den Anodenverbrauch und die daraus stöchiometrisch berechneten CO_2 -Emissionen beruhen auf einer breiten Datenbasis. Es liegen keine Angaben darüber vor, inwieweit die übrigen prozeßbedingten Emissionen repräsentativ sind. Die CF_4 - und C_2F_6 -Emissionen hängen stark von der eingesetzten Elektrolysetechnik und der Rauchgasreinigung ab [62]. Insbesondere die C_2F_6 -Emissionen sind schwer zu messen, die Unsicherheit der Werte ist daher vermutlich größer als dokumentiert. Kuppelprodukte entstehen nur in Form von Anodenresten, die innerhalb der Bilanz verwendet werden. Allokationen sind daher nicht erforderlich.

Bei der *Anodenherstellung* werden Petrolkoks, Pech und Anodenreste unter Einsatz von Füllpulver kalziniert [11]. Petrolkoks entsteht bei der Fraktionierung von Rohöl in der Raffinerie. Im dieser Bilanz zugrundeliegenden Modell nach [33] werden alle Raffinerieaufwendungen anderen Produkten zugeschlagen. Der Petrolkoks wird daher als Abprodukt aus der Raffinerie, also ohne Bereitstellung, bilanziert. Beim Füllpulver handelt es sich ebenfalls um Petrolkoks [11]. Das Steinkohlenteerpech wird als Steinkohle verbucht, nach

[60] eine zulässige Nährung. Die Anodenreste entstammen der Elektrolyse. Kuppelprodukte entstehen nicht. Die Datenqualität bei diesem Prozeß ist niedrig, da im Grunde nur eine Quelle zur Verfügung steht.

Die *Herstellung von Aluminiumfluorid* basiert auf einer Reaktion von Hexafluorokieselsäure (H_2SiF_6) mit Aluminiumhydroxid ($\text{Al}(\text{OH})_3$). Es entsteht Aluminiumfluorid, Kieselsäure und Wasser [60]. Für die Bereitstellung des Aluminiumhydroxids wird ein um die Kalzination reduziertes Bayer-Verfahren mit in den Prozeß integriert. Die Hexafluorokieselsäure fällt bei der Herstellung der Phosphorsäure als Nebenprodukt ab.

Das der Elektrolyse entstammende Aluminium wird in Blöcke oder Formen vergossen. Für die Blechherstellung werden *Walzbarren gegossen*. Bei diesem Prozeß wird Umlaufschrott aus der Barrenbearbeitung und den Walzprozessen zugegeben. Eine Zugabe von sortenreinen Neuschrotten aus Knetlegierungen ist ebenfalls möglich, wie existierende Verfahren zum Recycling gebrauchter Getränkedosen zeigen [60, 63, 64]. Angesichts der untergeordneten Bedeutung des Prozesses für die Prozeßkette im Bereich des Energiebedarfs und der Emissionen kann die Datenbasis als ausreichend angesehen werden. Kuppelprodukte entstehen nicht.

Die folgenden Prozesse des *Homogenisierens*, des *Warm- und Kaltwalzens*, des *Glühens* sowie des *Besäumens* sind bezüglich ihres Energiebedarfs nur von geringer Bedeutung für die Gesamtbilanz. Bei den prozeßbedingten Emissionen sind aus verdampfendem Walzöl primär Kohlenwasserstoffe zu erwarten. Eine Quelle [10] gibt einen Wert an, allerdings ohne nach Methan und nicht-methanem Anteil zu differenzieren. In der Prozeßkette haben diese Emissionen des Prozesses an der Summe der Methan- und nicht-methanen Kohlenwasserstoffe einen Anteil von lediglich 2%. Die Emission wird daher vernachlässigt. Die größte Bedeutung der Prozesse für die Prozeßkette liegt damit im Schrottanfall. Die Bestimmung des Schrottanfalls stützt sich weitgehend auf die Produktion von Getränkedosen. Für Rumpf- und Deckelblech treten dabei große Differenzen aufgrund der unterschiedlichen Legierungstypen auf [63], so daß die mögliche Streuung der Daten auch für Karosserieblech hinreichend gut erfaßt sein dürften. Eine kurze Beschreibung der Walzprozesse findet sich im Abschnitt 4.2.1. Als Kuppelprodukt tritt ausschließlich der Schrott auf, der bilanzintern als Umlaufschrott verwendet wird. Es besteht daher kein Allokationsproblem.

Beim *Stanzen und Pressen* im Automobilwerk entsteht im allgemeinen ein etwas größerer Anteil an Stanzresten als bei der Verwendung von Stahlblechen [40, 57]. Für die Aluminiumbleche liegt der Verschnitt bei etwa 45%, bezogen auf die Rohkarosserie. Damit ergibt sich analog zu den Stanzresten bei der Verarbeitung von Stahlblech ein Allokationsproblem. Der Neuschrott läßt sich bei der Walzbarrenherstellung zugeben, da es sich bei den Stanzresten ausschließlich um Knetlegierungen handelt. Nach [60, 64, 63] werden bei der Getränkedosenproduktion Knetlegierungsschrotte bereits auf diese Weise eingesetzt. Nach [65] würde bei einer getrennten Rückführung des Knetlegierungsgemisches des Audi A8 eine Zugabe von 25% Primäraluminium ausreichen, um wieder Karosserieblech

herstellen zu können. Selbst bei vollständiger Rückführung der Stanzrückstände liegt aber der Anteil des Neumaterials mit 50% deutlich höher. Nach [66] müßten dazu aufwendige Sortiereinrichtungen in Preßwerken installiert werden und nach Legierungsklassen und teilweise nach Legierungstypen trennen. Nach [67] muß nur nach zwei Legierungsklassen⁶ getrennt werden. Ein solcher Aufwand erschien vertretbar. Es wird daher der Vorschlag nach [55] zur Vermeidung des Allokationsproblems aufgegriffen. In [55] wird vorgeschlagen, die Stanzreste nach einer Neuschrottaufbereitung bei der Herstellung einer Pkw-Rohkarosserie aus Stahl als Kühlschrott im Stahlkonverter zu verwenden, wie in Abschnitt 4.2.1 erläutert. Hier wird nun davon ausgegangen, daß die Stanzreste bei der Walzbarrenherstellung zugegeben werden können. Abgesehen von den Stanzresten ist der Prozeß für die Prozeßkette von untergeordneter Bedeutung.

Der Neuschrott wird geshreddert, entölt und eingeschmolzen. Die Vorgänge werden aus Datenmangel zu einem Modul *Neuschrottaufbereitung* zusammengefaßt, der das Shreddern und Schmelzen berücksichtigt. Da der Beitrag dieses Prozesses zur Gesamtproduktion gering ist, reicht diese Näherung aus.

Die Teilprozeßkette "Tonerde" umfaßt die Einzelprozesse "Bauxitabbau", "Natronlaugeherstellung", "Kalksteinabbau", "Kalk-Kalziniieren" sowie "Bayer-Prozeß". Die Teilprozeßkette "Primäraluminium" umfaßt die Einzelprozesse "Schmelzflußelektrolyse", "Aluminiumfluoridherstellung", "Anodenherstellung" sowie "Walzbarrenherstellung".

⁶Nach dem ISO-Bezeichnungssystem muß zwischen der 5000er und 6000er Familie getrennt werden.

Tabelle 4.4: Einzelprozeßdaten zur Herstellung von Pkw-Rohkarosserien aus Aluminium. Emissionen der mit „p“ gekennzeichneten Energieeinträge sind prozeßspezifisch und in dieser Tabelle miterfaßt. Angegeben sind Mittelwert $\langle x \rangle$, Standardabweichung s , Standardabweichung des Mittelwertes m sowie Umfang der Datenbasis n . Alle Angaben beziehen sich auf ein Kilogramm Prozeßprodukt.

	Bauxitabbau				Bayer-Prozeß				Natronlauge (mit Steinsalzabbau)				Elektrolyse			
	$\langle x \rangle$	m	s	n	$\langle x \rangle$	m	s	n	$\langle x \rangle$	m	s	n	$\langle x \rangle$	m	s	n
Energieträger	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg		MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg		MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg		MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	
Strom UCPT ¹⁾	-	-	-	0	1,60E+00	3,99E-01	7,98E-01	5	4,77E+00	6,35E-01	8,98E-01	2	-	-	-	0
Strom Al-Ind. ¹⁾	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	5,40E+01	4,54E-01	4,81E+00	113
Strom int. ²⁾	7,20E-03	3,60E-03	3,60E-03	1	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Steinkohle	-	-	-	0	6,60E-01	7,18E-01	1,44E+00	5	2,88E-01	2,88E-01	4,07E-01	2	-	-	-	0
Erdgas	-	-	-	0	2,10E+00	8,84E-01	1,77E+00	5	9,20E-01	9,20E-01	1,30E+00	2	-	-	-	0
Heizöl S	5,28E-01	2,64E-01	2,64E-01	1	7,70E+00	1,15E+00	2,31E+00	5	2,34E+00	1,76E+00	2,49E+00	2	3,00E+00	1,50E+00	1,50E+00	1
Heizöl BL	-	-	-	0	4,30E-02	2,60E-02	5,20E-02	5	-	-	-	0	3,83E+00	1,91E+00	1,91E+00	1
Petrolkoks	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	1,60E+01	2,66E-01	2,15E+00	65
thermisch	6,14E-01	8,60E-02	1,22E-01	2	1,05E+01	6,58E-01	1,32E+00	5	3,55E+00	5,50E-01	7,78E-01	2	1,98E+01	2,71E-01	2,17E+00	64
Materialbedarf ¹⁾	kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg	
H2SiF6	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Kalkstein	-	-	-	0	-	-	-	0	5,25E-03	2,63E-03	2,63E-03	1	-	-	-	0
Kieselsäure	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Pech	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Petrolkoks	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Rohförderung	1,95E+00	8,43E-01	2,53E+00	10	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Sand	-	-	-	0	-	-	-	0	1,00E-04	5,00E-05	5,00E-05	1	-	-	-	0
Steinsalz	-	-	-	0	-	-	-	0	7,41E-01	1,01E-02	1,42E-02	2	-	-	-	0
Cl2	-	-	-	0	-	-	-	0	-4,49E-01	6,10E-03	8,63E-03	2	-	-	-	0
H2	-	-	-	0	-	-	-	0	-1,27E-02	1,72E-04	2,44E-04	2	-	-	-	0
Em. in Luft	kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg	
C2F6	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	1,65E-04	2,77E-05	4,80E-05	3
CF4	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	7,21E-04	2,70E-04	5,40E-04	4
CH4	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
CO	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	9,64E-02	2,68E-02	6,00E-02	5
CO2	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	1,60E+00	2,80E-02	2,28E-01	66
HCl	-	-	-	0	-	-	-	0	7,50E-05	3,75E-05	3,75E-05	1	-	-	-	0
HF	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	1,17E-03	5,30E-04	1,22E-03	6
N2O	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	1,00E-05	5,00E-06	5,00E-06	1
NH3	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
NM VOC	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	1,00E-04	5,00E-05	5,00E-05	1
NOx	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	1,76E-03	1,26E-03	1,78E-03	2
SO2	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	7,82E-03	2,37E-03	5,79E-03	6
Staub	-	-	-	0	-	-	-	0	1,54E-03	7,70E-04	7,70E-04	1	5,75E-03	2,97E-03	6,64E-03	5

¹⁾ verknüpft mit Modell nach Abschnitt 4.7²⁾ Teilweise außereuropäische Bereitstellung, hier verknüpft mit Modul UCPT¹⁾³⁾ Auswahl externer Stoffströme.

	Aluminiumfluoridherstellung				Anodenherstellung für Al-Elektrolyse				Walzbarrenherstellung				Homogenisieren			
	$\langle x \rangle$	m	s	n	$\langle x \rangle$	m	s	n	$\langle x \rangle$	m	s	n	$\langle x \rangle$	m	s	n
Energieträger	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg		MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg		MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg		MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	
Strom UCPT ¹⁾	6,30E-01	6,30E-01	8,91E-01	2	8,81E-01	2,01E-01	2,84E-01	2	2,43E-01	1,60E-02	3,91E-02	6	1,83E-01	5,00E-03	7,07E-03	2
Strom Al-Ind. ¹⁾	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Strom int. ²⁾	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Steinkohle	6,49E+00	3,25E+00	3,25E+00	1	3,48E+00	1,74E+00	1,74E+00	1	-	-	-	0	-	-	-	0
Erdgas	-	-	-	0	6,46E+00	2,14E+00	3,03E+00	2	2,40E+00	5,22E-01	1,28E+00	6	1,69E+00	8,45E-01	8,45E-01	1
Heizöl S	4,37E+00	2,19E+00	2,19E+00	1	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Heizöl BL	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Petrolkoks	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
thermisch	3,25E+01	2,17E+01	3,06E+01	2	8,43E+00	6,84E-01	1,19E+00	3	2,40E+00	5,22E-01	1,28E+00	6	1,69E+00	5,00E-03	7,07E-03	2
Materialbedarf ¹⁾	kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg	
H2SiF6	8,08E-01	4,04E-01	4,04E-01	1	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Kalkstein	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Kieselsäure	-5,39E-01	2,69E-01	2,69E-01	1	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Pech	-	-	-	0	2,29E-01	3,73E-02	7,46E-02	4	-	-	-	0	-	-	-	0
Petrolkoks	-	-	-	0	7,70E-01	4,32E-02	8,65E-02	4	-	-	-	0	-	-	-	0
Rohförderung	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Sand	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Steinsalz	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Cl2	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
H2	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Em. in Luft	kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg	
C2F6	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
CF4	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
CH4	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
CO	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
CO2	-	-	-	0	7,61E-01	3,80E-01	3,80E-01	1	-	-	-	0	-	-	-	0
HCl	-	-	-	0	-	-	-	0	5,00E-05	2,50E-05	2,50E-05	1	-	-	-	0
HF	2,00E-04	1,00E-04	1,00E-04	1	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
N2O	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
NH3	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
NM VOC	-	-	-	0	1,39E-05	6,94E-06	6,94E-06	1	-	-	-	0	-	-	-	0
NOx	-	-	-	0	5,65E-04	2,83E-04	2,83E-04	1	-	-	-	0	-	-	-	0
SO2	4,00E-05	2,00E-05	2,00E-05	1	5,79E-04	3,38E-04	4,78E-04	2	-	-	-	0	-	-	-	0
Staub	1,00E-02	5,00E-03	5,00E-03	1	3,39E-04	1,70E-04	1,70E-04	1	-	-	-	0	-	-	-	0

Tabelle 4.5: Sachbilanzdaten der Einzelprozeßdaten zur Herstellung von Pkw-Rohkarosserien aus Aluminium. Die Emissionen der mit „p“ gekennzeichneten Energieeinträge sind prozeßspezifisch und in dieser Tabelle miterfaßt. Emissionen aller anderen Energieträger werden im Energiebereitstellungsmodell berechnet. Alle Angaben beziehen sich auf ein Kilogramm Prozeßprodukt.

Energieträger	Warmwalzen von Aluminium				Kaltwalzen, Zwischenglühen				Besäumen von Aluminium-Kaltband				Pressen von Aluminiumblech			
	<x>	m	s	n	<x>	m	s	n	<x>	m	s	n	<x>	m	s	n
Strom UCPTE	5,55E-01	7,50E-02	1,06E-01	2	7,86E-01	1,87E-01	3,24E-01	3	1,92E-01	1,28E-01	2,21E-01	3	1,61E+00	6,50E-01	1,13E+00	3
Strom Al-Ind. ¹⁾	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Strom int. ²⁾	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Steinkohle	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Erdgas	-	-	-	0	4,22E-01	2,11E-01	2,11E-01	1	1,90E-01	1,90E-01	2,69E-01	2	-	-	-	0
Heizöl S	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Heizöl EL	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Petrolkoks	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
thermisch	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1	4,36E-01	1,40E-02	1,98E-02	2	1,90E-01	1,90E-01	2,69E-01	2	-	-	-	0
Materialbedarf ³⁾	kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg	
H2SiF6	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Kalkstein	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Kieselsäure	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Pech	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Petrolkoks	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Rohförderung	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Sand	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Steinsalz	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Cl2	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
H2	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Em. in Luft	kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg	
CF4	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
CF4	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
CH4	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
CO	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
CO2	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
HCl	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
HF	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
N2O	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
NH3	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
NMVOG	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
NOx	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
SO2	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Staub	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0

Energieträger	Fügen einer Alukarosserie				Ankerbohren				Neuschweißaufbereitung				TPK Tonerdherstellung ⁴⁾				TPK Primäraluminiumherstellung ⁵⁾			
	<x>	m	s	n	<x>	m	s	n	<x>	m	s	n	<x>	m	s	n	<x>	m	s	n
Strom UCPTE	4,97E+00	1,36E+00	3,33E+00	6	-	-	-	0	1,07E+00	6,59E-01	9,32E-01	2	-	-	-	0	-	-	-	0
Strom Al-Ind. ¹⁾	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	5,51E+01	2,76E+01	2,76E+01	1
Strom int. ²⁾	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Steinkohle	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Erdgas	-	-	-	0	4,18E+00	2,09E+00	2,09E+00	1	3,50E+00	1,41E+00	2,00E+00	2	-	-	-	0	-	-	-	0
Heizöl S	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Heizöl EL	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Petrolkoks	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
thermisch	-	-	-	0	4,18E+00	2,09E+00	2,09E+00	1	3,50E+00	1,41E+00	2,00E+00	2	-	-	-	0	-	-	-	0
Materialbedarf ³⁾	kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg	
H2SiF6	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Kalkstein	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Kieselsäure	-1,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1	1,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Pech	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Petrolkoks	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Rohförderung	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Sand	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Steinsalz	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Cl2	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
H2	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Em. in Luft	kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg	
CF4	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	4,00E-04	2,00E-04	2,00E-04	1
CF4	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	3,39E-03	1,69E-03	1,69E-03	1
CH4	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	1,45E-03	7,40E-04	7,40E-04	1	3,39E-03	1,69E-03	1,69E-03	1
CO	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	2,43E-04	1,22E-04	1,22E-04	1	6,04E-02	3,02E-02	3,02E-02	1
CO2	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	1,16E+00	5,50E-01	5,50E-01	1	2,36E+00	1,18E+00	1,18E+00	1
HCl	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	2,84E-05	1,42E-05	1,42E-05	1	1,05E-05	5,26E-06	5,26E-06	1
HF	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	2,24E-06	1,12E-06	1,12E-06	1	1,01E-06	5,04E-07	5,04E-07	1
N2O	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
NH3	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	3,50E-07	1,78E-07	1,78E-07	1	1,27E-07	6,37E-08	6,37E-08	1
NMVOG	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	2,33E-03	1,27E-03	1,27E-03	1	3,92E-03	1,96E-03	1,96E-03	1
NOx	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	3,20E-03	1,60E-03	1,60E-03	1	2,15E-03	1,07E-03	1,07E-03	1
SO2	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	1,08E-02	5,40E-03	5,40E-03	1	1,78E-02	8,91E-03	8,91E-03	1
Staub	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0	7,91E-03	3,96E-03	3,96E-03	1	2,14E-03	1,07E-03	1,07E-03	1

¹⁾ Umfaßt die Einzelprozesse "Barratfabrik", "Bayer-Prozeß", "Natriumlage", "Kalksteinabbau", "Kalk-Klärung".

²⁾ Umfaßt Einzelprozesse "Elektrolyse", "Aluminiumfluoridherstellung", "Anodenherstellung für Al-Elektrolyse".

4.2.3 Nutzungsphase

Viele Angaben über die Nutzungsphase beruhen auf Schätzungen oder speziell gewählten Fahrzyklen. Die vorhandenen Daten sind daher relativ unsicher [55]. Demzufolge wird in diesem Abschnitt versucht, die Nutzungsphase soweit wie in diesem Projekt realisierbar abzubilden. Es müssen jedoch eine Reihe von Annahmen und Vereinfachungen einfließen. Der Einfluß dieser Unsicherheiten wird im Kapitel 5 soweit möglich diskutiert.

Die Behandlung der Nutzungsphase basiert im wesentlichen auf zwei Datenquellen. Aus Herstellerangaben zum Treibstoffverbrauch nach DIN 70 030 [68] wird die Masseabhängigkeit des Treibstoffverbrauchs abgeschätzt. Verbrauch und Fahrleistungen werden nach Angaben des TÜV Rheinland für das IKARUS Verkehrsmodell [35, 70] zugrundegelegt. Das Basisjahr dieser Angaben ist 1989. Es wird keine Korrektur dieser Daten auf aktuelle Werte vorgenommen, da keine Daten zur Verfügung stehen, die eine solche Korrektur in verlässlicher Art gestatten.

Die Abschätzung der Streumaße erfolgt durch gewichtete Mittelung über die verschiedenen Fahrzustände „frei“, „teilgebunden“, „gebunden“ und „Stau“. Auf diese Weise erhält man für die Verkehrswege innerorts, außerorts und Autobahn Energieverbrauchs- und Emissionswerte und deren Streuungen. Es wird dabei davon ausgegangen, daß die verschiedenen Fahrzustände auch verschiedene Fahrweisen hinreichend repräsentieren und die wesentlichen Quellen der Datenstreuungen somit erfaßt sind. Die Gewichtungsfaktoren für die Anteile der jeweiligen Fahrzustände stammen ebenfalls vom TÜV Rheinland und sind Tabelle 4.6 zu entnehmen.

Für jede Fahrzeugklasse wird eine individuelle Zusammensetzung der genutzten Straßenarten nach [39] zugrundegelegt, wie in Tabelle 4.7 dokumentiert.

Die Nutzungsphase dominiert im Bereich des Energieaufwandes sowie bei bestimmten Emissionen. Für Fahrzeuge mit Ottomotor und geregeltem Katalysator sind zumindest CO₂- und SO₂-Emissionen direkt mit dem Treibstoffverbrauch korreliert. Für diese Emissionen sowie den Energieeinsatz ist daher die Frage nach der Masseabhängigkeit des Treibstoffverbrauchs von großer Relevanz. Im Gegensatz dazu sind nach Darstellungen in [55] Kohlenwasserstoffe, Stickoxide und Kohlenmonoxid in guter Näherung unabhängig von der Fahrzeugmasse. Nach den Daten in [69] sind auch die Partikelemissionen aus Dieselmotoren bei Pkw weitgehend unabhängig vom Dieselverbrauch.

Nach DIN [68] wird der Treibstoffverbrauch im sogenannten ECE-Fahrzyklus sowie in

Tabelle 4.6: Anteile der Fahrzustände auf den verschiedenen Straßenarten für Pkw.

	frei	teilgebunden	gebunden	Stau
Bundesautobahnen	34%	35%	25%	6%
übrige Außerortsstraßen	22%	45%	30%	3%
Innerortsstraßen	15%	45%	25%	15%

Tabelle 4.7: Anteil der genutzten Straßenarten nach [39].

Antriebsart	Fahrzeugklasse	Bundesautobahnen	übrige Außerortsstraßen	Innerortsstraßen
Otto-motor	Kleinwagen	17%	42%	41%
	Mittelklasse	25%	39%	36%
	Oberklasse	40%	29%	31%
Diesel-motor	Mittelklasse	24%	39%	37%
	Oberklasse	30%	35%	35%

Konstantfahrten mit einer Geschwindigkeit von 90 km/h beziehungsweise 120 km/h gemessen. Der ECE-Zyklus simuliert eine Innerortsfahrt. Als Kenngröße wird aus diesen drei Werten häufig der sogenannte Drittel-Mix als arithmetisches Mittel bestimmt. Trägt man den Treibstoffverbrauch nach den einzelnen Fahrzyklen getrennt über dem Leergewicht auf, so ergibt sich näherungsweise ein linearer Zusammenhang wie in Abbildung 4.3 zu sehen ist.

Führt man für die Daten eine lineare Regression durch, so ergeben sich folgende Steigungen:

$$\begin{aligned}
 \text{Stadt} &= 0,84 \\
 90 \text{ km/h} &= 0,37 \\
 120 \text{ km/h} &= 0,37 \\
 \text{Drittel-Mix} &= 0,53 \\
 &(\text{Alle Angaben in l}/(100 \text{ km} \cdot 100 \text{ kg}).)
 \end{aligned}$$

Allerdings geben diese Werte den Zusammenhang verfälscht wieder, weil schwerere Fahrzeuge im allgemeinen eine größere Querschnittsfläche und damit höheren Luftwiderstand besitzen. Wie Abbildung 4.4 zeigt, hängen auch Größe wie Leistung, Hubraum und maximale Geschwindigkeit von der Masse ab und beeinflussen den Verbrauch.

Um die funktionelle Äquivalenz von Leichtbaufahrzeugen und Vergleichsfahrzeugen zu gewährleisten, müssen Fahrkomfort und Fahrleistungen erhalten bleiben. Gleicher Fahrkomfort bedeutet hier identische Abmessungen und damit unveränderte effektive Querschnittsfläche A sowie Luftwiderstandsbeiwert c_{W} .

Die Fahrleistungen werden über das Beschleunigungsvermögen und die Höchstgeschwindigkeit v_{max} charakterisiert. Als Maßstab für das Beschleunigungsvermögen läßt sich das Verhältnis zwischen Motorleistung P und Leergewicht M heranziehen. Somit läßt sich die

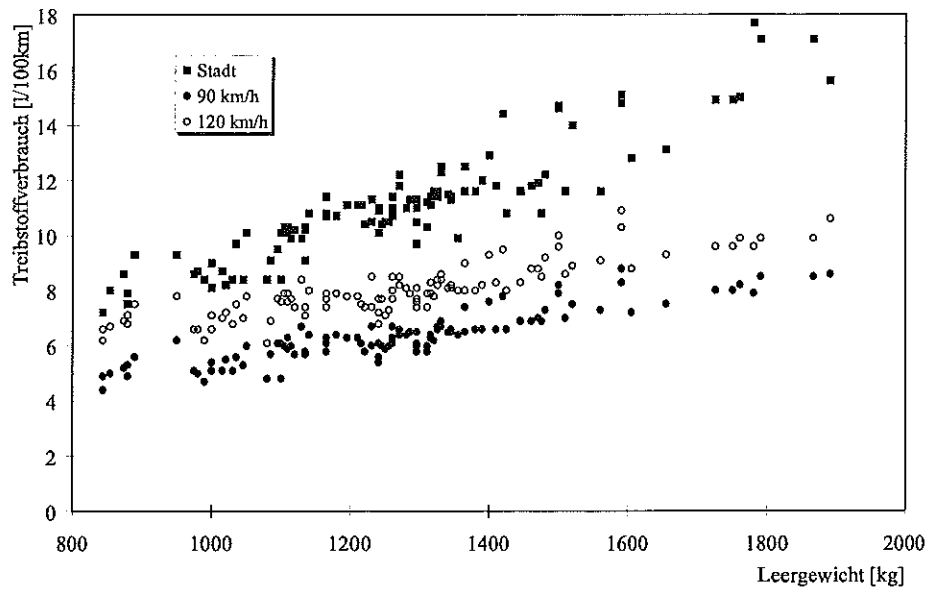


Abbildung 4.3: Treibstoffverbrauch nach DIN 70 030 für Pkw deutscher Hersteller (Handschaltgetriebe, Ottomotor, Modelljahr 1995) in Abhängigkeit vom Leergewicht [36].

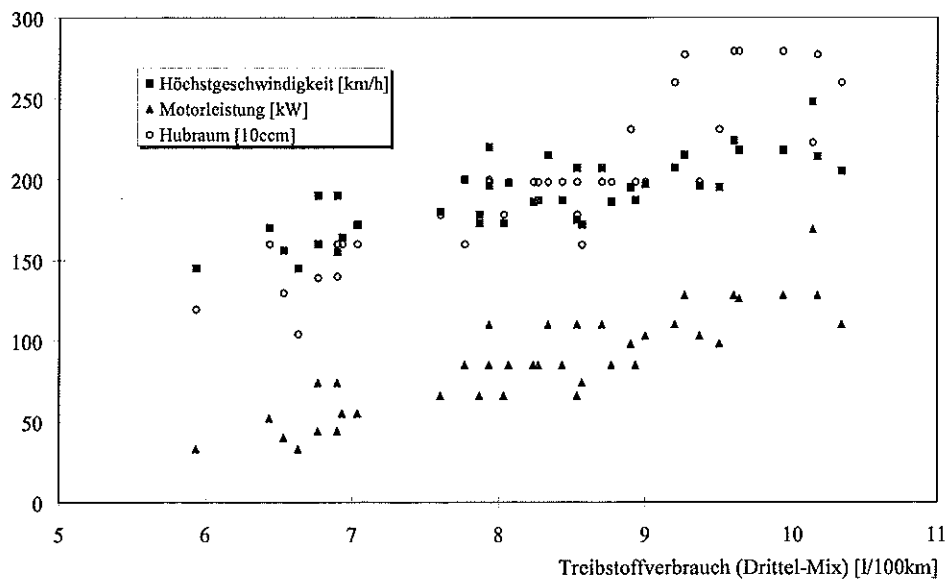


Abbildung 4.4: Abhängigkeit des Treibstoffverbrauchs (Drittelmix) von den Fahrzeugkenngrößen Hubraum, Motorleistung und Höchstgeschwindigkeit. Dargestellt sind die Daten von Fahrzeugen mit Handschaltgetriebe und Ottomotor nach [36].

Forderung nach gleichem Fahrkomfort und gleichen Fahrleistungen wie folgt ausdrücken:

$$\begin{aligned} c_W &= \text{const}, \\ A &= \text{const}, \\ \frac{P}{M} &= \text{const}, \\ v_{\max} &= \text{const}. \end{aligned}$$

Es wurde nun eine lineare Regression des Verbrauches gegenüber den Größen $\frac{P}{H}$, $\frac{H}{P}$, $c_W \cdot A$, P , $\ln(P)$, M , H , $\ln(H)$, $v_{\max}$ und $\ln(v_{\max})$ durchgeführt. Die Güte der Regression läßt sich mit dem Korrelationskoeffizienten r^2

$$r^2 := \frac{[\sum_i (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]^2}{\sum_i (x_i - \bar{x})^2 \sum_i (y_i - \bar{y})^2} \leq 1$$

bestimmen [24, 28]. Je näher dabei r^2 bei 1 liegt, desto besser beschreibt die Ausgleichsgerade die Datenpunkte. Da der Kraftstoffverbrauch von den verwendeten Parametern in vergleichbarer Näherung linear abhängt (siehe Abbildung 4.4), ist es nicht überraschend, daß verschiedene Parametrisierungen zu vergleichbaren Korrelationskoeffizienten r^2 führen. Dieser Parameter allein reicht also nicht aus, die geeigneteste Beschreibung der Daten zu bestimmen. Folgende weitere Kriterien wurden verwendet:

1. Der konstante Term der Ausgleichsfunktion

$$f(\vec{x}) = \sum_i a_i x_i + c$$

sollte im Rahmen seiner Standardabweichung bei Null liegen, da andernfalls ein Indiz für die Außerachtlassung relevanter Einflüsse gegeben ist.

2. Alle Koeffizienten a_i sollten im Rahmen der Studentschen t -Verteilung geeignet sein, den Verbrauch zu klassifizieren.

Dem ersten Kriterium liegt dabei die Überlegung zugrunde, daß der Einfluß aller relevanten Parameter auf den Treibstoffverbrauch erfaßt sein sollte, um den Einfluß einzelner von ihnen korrekt bestimmen zu können. Ist die Parametrisierung vollständig, so sollte der Treibstoffverbrauch mit dem Verschwinden der Parameter im Rahmen der zur Verfügung stehenden Statistik gegen Null gehen:

$$\lim_{\vec{x} \rightarrow \vec{0}} E(\vec{x}) = 0 \quad ,$$

E : Treibstoffverbrauch.

Nun kann man versuchen, Vollständigkeit im obigen Sinne durch Einführung einer Vielzahl von Parametern und damit Freiheitsgraden in der Regression zu erreichen. Da hier der Einfluß einzelner Faktoren bestimmt werden soll, sollte jeder einzelne auch aussagekräftig sein. Ein Maß dafür stellt die Studentsche t -Statistik bereit. Grundlage bildet dabei

Tabelle 4.8: Schwellenwerte der t -Verteilung für einseitige Abgrenzung nach [29]. Für Fahrzeuge mit Ottomotor wird in der hier vorliegenden Analyse ein typischer Freiheitsgrad von 95, bei Fahrzeugen mit Dieselmotor aufgrund der geringeren Statistik ein Freiheitsgrad von 40 beobachtet.

Freiheitsgrad	Vertrauensniveau	
	90%	95%
95	1,66	1,98
40	1,68	2,02

das Verhältnis zwischen den Koeffizienten a_i und ihren Standardabweichungen s_{a_i} : $\frac{a_i}{s_{a_i}}$. Diese Größe unterliegt einer t -Verteilung und muß somit eine bestimmte Schwelle überschreiten, um sich bezüglich eines festzulegenden Vertrauensniveaus einseitig gegen $0 \pm s_{a_i}$ abzugrenzen. Diese Schwellenwerte findet man in Abhängigkeit von Freiheitsgrad und Vertrauensniveau tabelliert in Statistikbüchern (siehe auch Abschnitt 3.1). Voraussetzung für diesen Test ist, daß die Werte um a_i gemäß einer Normalverteilung streuen und daß die zu vergleichenden Größen die gleiche Standardabweichung σ haben. Letzteres ist hier per constructionem gegeben. Nach [32] ist der Test gegenüber diesen Voraussetzungen nicht sehr empfindlich. Tabelle 4.8 zeigt die Schwellenwerte nach [29] für Freiheitsgrade, wie sie bei der Regression für Fahrzeuge mit Otto- bzw. Dieselmotor auftreten. Die Widerstandsbeiwerte wurden bei den Herstellern erfragt. Die übrigen Daten wurden [36] entnommen. Für die Fahrzeuge mit Ottomotor erfüllte nur eine Parametrisierung für nahezu alle drei Fahrzyklen diese Bedingungen:

$$E = a_3 M_{\text{leer}} + a_2 \frac{P}{M_{\text{leer}}} + a_1 c_W + a_0, \quad (4.1)$$

M_{leer} : Leergewicht,
 P : Motorleistung,
 c_W : Luftwiderstandsbeiwert.

Das Ergebnis der linearen Regression ist in Tabelle 4.9 aufgelistet. Erwartungsgemäß stellt der Luftwiderstandsbeiwert im Rahmen der zur Verfügung stehenden Statistik keinen geeigneten Parameter zur Klassifizierung des Treibstoffverbrauchs im Stadtzyklus dar. Dies liegt in der geringen Durchschnittsgeschwindigkeit von 19 km/h, bei einer Maximalgeschwindigkeit von 50 km/h, begründet.

Tabelle 4.9: Ergebnis einer linearen Regression des Treibstoffverbrauchs von Pkw mit Ottomotoren gegenüber dem Leergewicht (Koeffizient a_3), dem Verhältnis Motorleistung und Leergewicht (a_2) und dem Luftwiderstandsbeiwert (a_1). Der konstante Term a_0 unterlag keinerlei Beschränkungen. Zusätzlich sind Korrelationskoeffizient r^2 und die Anzahl der Freiheitsgrade f angegeben.

Fahrzyklus	a_3 $\left[10^{-3} \cdot \frac{1}{100 \text{ km kg}}\right]$	a_2 $\left[\frac{1}{100 \text{ km}} \frac{\text{kg}}{\text{kW}}\right]$	a_1 $\left[\frac{1}{100 \text{ km}}\right]$	a_0 $\left[\frac{1}{100 \text{ km}}\right]$	r^2	f
ECE	$6,42 \pm 0,45$	$35,53 \pm 5,27$	$1,69 \pm 1,67$	$-0,72 \pm 0,98$	0,90	94
90 km/h	$2,63 \pm 0,23$	$15,15 \pm 2,69$	$3,55 \pm 0,85$	$-0,33 \pm 0,50$	0,87	94
120 km/h	$2,55 \pm 0,28$	$14,71 \pm 3,31$	$5,33 \pm 1,05$	$-0,31 \pm 0,62$	0,82	94

Nach der Fahrwiderstandsgleichung

$$F = mgf_R + \frac{\rho_L}{2} c_W A v^2 + a \left(m + \sum m_{\text{rot}} \right) + mg \sin \alpha, \quad (4.2)$$

m	: Fahrzeugmasse,	g	: Fallbeschleunigung,
f_R	: Rollwiderstand,	ρ_L	: Dichte von Luft,
c_W	: Luftwiderstandsbeiwert,	A	: Querschnittsfläche,
v	: Geschwindigkeit,	a	: Beschleunigung,
m_{rot}	: rotierende Massen,	α	: Steigungswinkel,

hängt der Luftwiderstand quadratisch von der Geschwindigkeit ab.

Es ist daher zu erwarten, daß der Luftwiderstandsbeiwert bei den Fahrzyklen mit $v = 90 \text{ km/h} = \text{const}$ und $v = 120 \text{ km/h} = \text{const}$ deutlich an Signifikanz gewinnt, wie Tabelle 4.9 bestätigt.

Nimmt man den Luftwiderstandsbeiwert c_W aus der Parametrisierung heraus, um gemäß des oben formulierten zweiten Kriteriums Aussagekraft für alle Koeffizienten zu gewährleisten, so ergeben sich sowohl für das Streuungsmaß r^2 als auch für die Koeffizienten

Tabelle 4.10: Resultat einer linearen Regression des Treibstoffverbrauchs von Pkw mit Ottomotoren gegen Leergewicht (Koeffizient a_3), Verhältnis Motorleistung und Leergewicht (a_2) und Konstante Term a_0 . Zusätzlich angegeben sind Korrelationskoeffizient r^2 und die Anzahl der Freiheitsgrade f .

Fahrzyklus	a_3 $\left[10^{-3} \cdot \frac{1}{100 \text{ km kg}}\right]$	a_2 $\left[\frac{1}{100 \text{ km}} \frac{\text{kg}}{\text{kW}}\right]$	a_0 $\left[\frac{1}{100 \text{ km}}\right]$	r^2	f
ECE	$6,63 \pm 0,40$	$32,89 \pm 5,01$	$-0,19 \pm 0,39$	0,90	95

Tabelle 4.11: Ergebnis einer linearen Regression des Treibstoffverbrauchs von Pkw mit Dieselmotor gegenüber dem Leergewicht (Koeffizient a_3), dem Verhältnis Motorleistung und Leergewicht (a_2) und dem Luftwiderstandsbeiwert (a_1). Der konstante Term a_0 unterlag keinerlei Beschränkungen. Zusätzlich sind Korrelationskoeffizient r^2 und die Anzahl der Freiheitsgrade f angegeben.

Fahrzyklus	a_3 $\left[10^{-3} \cdot \frac{1}{100 \text{ km kg}}\right]$	a_2 $\left[\frac{1}{100 \text{ km}} \frac{\text{kg}}{\text{kW}}\right]$	a_1 $\left[\frac{1}{100 \text{ km}}\right]$	a_0 $\left[\frac{1}{100 \text{ km}}\right]$	r^2	f
ECE	$5,13 \pm 0,35$	$23,60 \pm 6,99$	$0,59 \pm 1,49$	$-0,26 \pm 0,97$	0,92	40
90 km/h	$2,24 \pm 0,17$	$3,21 \pm 3,46$	$2,53 \pm 0,74$	$0,33 \pm 0,48$	0,89	40
120 km/h	$2,44 \pm 0,25$	$-1,47 \pm 4,91$	$3,44 \pm 1,05$	$1,54 \pm 0,68$	0,81	40

vernachlässigbar kleine Änderungen (siehe Tabelle 4.10). Die Änderungen gegenüber den Werten in Tabelle 4.9 liegen alle deutlich innerhalb der ermittelten Standardabweichungen. Um die Vorgehensweise zu vereinfachen und ein Höchstmaß an Transparenz sicherzustellen, wird daher auf die Werte aus 4.9 für alle Fahrzyklen zurückgegriffen.

Bei den Dieselfahrzeugen ergibt sich ein etwas anderes Bild (siehe Tabelle 4.11). Die Größe $\frac{P}{M}$ erweist sich für den ECE-Zyklus ebenfalls als klassifikationsfähig für den Treibstoffverbrauch. Bei Konstantfahrten mit 90 km/h bzw. 120 km/h hingegen wird keine statistische Signifikanz gemäß dem t -Test erreicht, wie aus Tabelle 4.11 hervorgeht. Dies dürfte im wesentlichen zwei Gründe haben. Zum einen macht sich hier der höhere Wirkungsgrad des Dieselmotors bemerkbar, so daß der Luftwiderstand an Bedeutung gewinnt. Zum anderen variiert bei den Dieselfahrzeugen $\frac{P}{M}$ nur im Bereich von 0,035 bis 0,08, während bei den Fahrzeugen mit Ottomotor Werte zwischen 0,035 und 0,12 auftreten. Beides führt dazu, daß eine höhere Statistik benötigt wird, um den Einfluß von $\frac{P}{M}$ signifikant zu erfassen. Genau im Gegensatz dazu liegen aber deutlich weniger Daten von Dieselfahrzeugen vor. Weiter ist Tabelle 4.11 zu entnehmen, daß die Forderung, der konstante Term möge innerhalb einer Standardabweichung die Null einschließen, nicht erfüllt ist. Dies erklärt sich aus den zum Teil groben Angaben für die Luftwiderstandsbeiwerte. Einige Automobilkonzerne stellen lediglich Gruppenwerte bzw. Werte für Standardausführungen zur Verfügung. Werte für Dieselfahrzeuge können von diesen jedoch abweichen. Tabelle 4.12 zeigt die Ergebnisse der linearen Regression für eine Parametrisierung ohne $\frac{P}{M}$. Die Werte bleiben innerhalb ihrer Standardabweichung konstant. Analog zum Fall bei den Fahrzeugen mit Ottomotor werden daher auch hier die Parameter gemäß Tabelle 4.11 übernommen. Aus den bisherigen Betrachtungen läßt sich nun die Masseabhängigkeit des relativen Treibstoffverbrauchs ableiten und auf die Verbrauchswerte des TÜV Rheinland übertragen.

Tabelle 4.12: Ergebnis einer linearen Regression des Treibstoffverbrauchs von Pkw mit Dieselmotor gegen Leergewicht (Koeffizient a_3), Luftwiderstandsbeiwert (a_1) und Konstante a_0 . Zusätzlich angegeben sind Korrelationskoeffizient r^2 und die Anzahl der Freiheitsgrade f .

Fahrzyklus	a_3 $\left[10^{-3} \cdot \frac{1}{100\text{km kg}}\right]$	a_1 $\left[\frac{1}{100\text{km}}\right]$	a_0 $\left[\frac{1}{100\text{km}}\right]$	r^2	f
ECE	$5,87 \pm 0,31$	$0,95 \pm 1,67$	$-0,18 \pm 1,08$	0,90	41
90 km/h	$2,34 \pm 0,14$	$2,58 \pm 0,74$	$0,34 \pm 0,48$	0,89	41
120 km/h	$2,39 \pm 0,19$	$3,42 \pm 1,03$	$1,53 \pm 0,67$	0,81	41

Dabei werden die ermittelten Verbrauchsminderungen aus dem DIN-Verbrauch mit den TÜV Angaben wie folgt verknüpft:

$$\begin{aligned}
 \text{ECE} &\rightarrow \text{Innerorts} \\
 90 \text{ km/h} &\rightarrow \text{Außerorts ohne Autobahn} \\
 120 \text{ km/h} &\rightarrow \text{Autobahn.}
 \end{aligned}$$

In der Analyse erweist es sich als vorteilhaft statt der Einsparung durch die Leichtbaukarosserien den mit den schwereren Karosserien verknüpften Mehrverbrauch zu betrachten (siehe Kapitel 5). In den Tabellen 4.13 und 4.14 wird der Mehrverbrauch einer konventionellen Stahlkarosserie und einer Stahl-Leichtbaukonstruktion gegenüber einer leichteren Aluminiumkarosserie angegeben. Die Aluminiumkarosserie weist gegenüber der konventionellen Stahlkarosserie eine Massereduktion von 35% (Leichtbaugrad) auf. Für diesen Fall werden in den Tabellen 4.13 und 4.14 die Einsparungen ausgewiesen. Diese lassen sich nun durch Vorzeichenwechsel zum Mehrverbrauch der Stahlkarosserie uminterpretieren. Die Stahl-Leichtbaukarosserie weist einen Leichtbaugrad von 20% gegenüber der konventionellen Karosserie auf. Ihr Mehrverbrauch gegenüber der Aluminiumkarosserie entspricht daher betraglich den Einsparungen bei einem Leichtbaugrad von 15%. Daher wird dies als zweiter Fall in den Tabellen 4.13 und 4.14 behandelt. Die Uminterpretation erfolgt wiederum durch Vorzeichenwechsel.

Tabelle 4.13: Einsparung bei Treibstoffbereitstellung und Betrieb von Pkw mit Ottomotor über die gesamte Laufleistung. Angegeben sind Mittelwert $\langle x \rangle$, Standardabweichung des Mittelwertes m und Standardabweichung s von Energiebedarf und Emissionen für die Leichtbaugrade φ von 15% und 35% Massenreduktion der Rohkarosserie.

	Kleinwagen, $\varphi=15\%$, Ottomotor						Kleinwagen, $\varphi=35\%$, Ottomotor					
	Kraftstoffbereitstellung			Betrieb			Kraftstoffbereitstellung			Betrieb		
	$\langle x \rangle$	m	s	$\langle x \rangle$	m	s	$\langle x \rangle$	m	s	$\langle x \rangle$	m	s
Energieträger	[MJ/145 000km]			[MJ/145 000km]			[MJ/145 000km]			[MJ/145 000km]		
Rohöl	-1,10E+04	2,54E+03	3,68E+03	-	-	-	-2,56E+04	5,93E+03	8,58E+03	-	-	-
Benzin	9,13E+03	0,00E+00	0,00E+00	-9,13E+03	1,97E+03	2,97E+03	2,13E+04	0,00E+00	0,00E+00	-2,13E+04	4,61E+03	6,93E+03
Em. in Luft	[kg/1450 00km]			[kg/1450 00km]			[kg/1450 00km]			[kg/1450 00km]		
CH ₄	-5,81E-01	1,26E-01	1,89E-01	-	-	-	-1,36E+00	2,93E-01	4,40E-01	-	-	-
CO	-7,86E-02	5,02E-02	8,57E-02	-	-	-	-1,83E-01	1,17E-01	2,00E-01	-	-	-
CO ₂	-1,13E+02	4,59E+01	7,68E+01	-6,86E+02	1,48E+02	2,23E+02	-2,63E+02	1,07E+02	1,79E+02	-1,60E+03	3,46E+02	5,20E+02
HCl	-4,70E-03	2,56E-03	2,80E-03	-	-	-	-1,10E-02	5,98E-03	6,54E-03	-	-	-
HF	-4,96E-04	2,70E-04	2,96E-04	-	-	-	-1,16E-03	6,31E-04	6,90E-04	-	-	-
N ₂ O	-2,28E-03	1,24E-03	1,36E-03	-	-	-	-5,31E-03	2,90E-03	3,17E-03	-	-	-
NH ₃	-2,46E-03	2,41E-03	3,42E-03	-	-	-	-5,74E-03	5,62E-03	7,98E-03	-	-	-
NM VOC	-1,94E+00	4,19E-01	6,30E-01	-	-	-	-4,52E+00	9,78E-01	1,47E+00	-	-	-
NO _x	-4,56E-01	2,03E-01	3,41E-01	-	-	-	-1,06E+00	4,74E-01	7,96E-01	-	-	-
SO ₂	-7,29E-01	3,48E-01	5,87E-01	-5,44E-02	1,18E-02	1,77E-02	-1,70E+00	8,11E-01	1,37E+00	-1,27E-01	2,75E-02	4,13E-02
Staub	-2,41E-01	2,28E-01	3,24E-01	-	-	-	-5,63E-01	5,32E-01	7,55E-01	-	-	-

	Mittelklasse, $\varphi=15\%$, Ottomotor						Mittelklasse, $\varphi=35\%$, Ottomotor					
	Kraftstoffbereitstellung			Betrieb			Kraftstoffbereitstellung			Betrieb		
	$\langle x \rangle$	m	s	$\langle x \rangle$	m	s	$\langle x \rangle$	m	s	$\langle x \rangle$	m	s
Energieträger	[MJ/155 000km]			[MJ/155 000km]			[MJ/155 000km]			[MJ/155 000km]		
Rohöl	-1,29E+04	3,09E+03	4,38E+03	-	-	-	-3,01E+04	7,22E+03	1,02E+04	-	-	-
Benzin	1,07E+04	0,00E+00	0,00E+00	-1,07E+04	2,42E+03	3,54E+03	2,50E+04	0,00E+00	0,00E+00	-2,50E+04	5,64E+03	8,26E+03
Em. in Luft	[kg/155 000km]			[kg/155 000km]			[kg/155 000km]			[kg/155 000km]		
CH ₄	-6,82E-01	1,54E-01	2,25E-01	-	-	-	-1,59E+00	3,59E-01	5,26E-01	-	-	-
CO	-9,23E-02	5,92E-02	1,01E-01	-	-	-	-2,15E-01	1,38E-01	2,35E-01	-	-	-
CO ₂	-1,33E+02	5,46E+01	9,05E+01	-8,06E+02	1,82E+02	2,66E+02	-3,09E+02	1,27E+02	2,11E+02	-1,88E+03	4,24E+02	6,21E+02
HCl	-5,53E-03	3,03E-03	3,31E-03	-	-	-	-1,29E-02	7,07E-03	7,72E-03	-	-	-
HF	-5,83E-04	3,20E-04	3,49E-04	-	-	-	-1,36E-03	7,46E-04	8,15E-04	-	-	-
N ₂ O	-2,68E-03	1,47E-03	1,60E-03	-	-	-	-6,25E-03	3,43E-03	3,74E-03	-	-	-
NH ₃	-2,89E-03	2,84E-03	4,02E-03	-	-	-	-6,75E-03	6,62E-03	9,38E-03	-	-	-
NM VOC	-2,28E+00	5,13E-01	7,52E-01	-	-	-	-5,31E+00	1,20E+00	1,75E+00	-	-	-
NO _x	-5,36E-01	2,41E-01	4,02E-01	-	-	-	-1,25E+00	5,62E-01	9,39E-01	-	-	-
SO ₂	-8,57E-01	4,12E-01	6,91E-01	-6,49E-02	1,46E-02	2,15E-02	-2,00E+00	9,61E-01	1,61E+00	-1,51E-01	3,42E-02	5,01E-02
Staub	-2,83E-01	2,69E-01	3,81E-01	-	-	-	-6,61E-01	6,27E-01	8,88E-01	-	-	-

	Oberklasse, $\varphi=15\%$, Ottomotor						Oberklasse, $\varphi=35\%$, Ottomotor					
	Kraftstoffbereitstellung			Betrieb			Kraftstoffbereitstellung			Betrieb		
	$\langle x \rangle$	m	s	$\langle x \rangle$	m	s	$\langle x \rangle$	m	s	$\langle x \rangle$	m	s
Energieträger	[MJ/170 000km]			[MJ/170 000km]			[MJ/170 000km]			[MJ/170 000km]		
Rohöl	-1,47E+04	3,45E+03	4,73E+03	-	-	-	-3,44E+04	8,06E+03	1,10E+04	-	-	-
Benzin	1,23E+04	0,00E+00	0,00E+00	-1,23E+04	2,69E+03	3,80E+03	2,86E+04	0,00E+00	0,00E+00	-2,86E+04	6,28E+03	8,88E+03
Em. in Luft	[kg/170 000km]			[kg/170 000km]			[kg/170 000km]			[kg/170 000km]		
CH ₄	-7,80E-01	1,71E-01	2,42E-01	-	-	-	-1,82E+00	3,99E-01	5,64E-01	-	-	-
CO	-1,06E-01	6,75E-02	1,15E-01	-	-	-	-2,46E-01	1,58E-01	2,67E-01	-	-	-
CO ₂	-1,52E+02	6,20E+01	1,02E+02	-9,21E+02	2,02E+02	2,86E+02	-3,54E+02	1,45E+02	2,38E+02	-2,15E+03	4,71E+02	6,67E+02
HCl	-6,32E-03	3,45E-03	3,72E-03	-	-	-	-1,47E-02	8,05E-03	8,67E-03	-	-	-
HF	-6,66E-04	3,64E-04	3,92E-04	-	-	-	-1,56E-03	8,49E-04	9,15E-04	-	-	-
N ₂ O	-3,06E-03	1,67E-03	1,80E-03	-	-	-	-7,14E-03	3,90E-03	4,20E-03	-	-	-
NH ₃	-3,30E-03	3,24E-03	4,58E-03	-	-	-	-7,71E-03	7,56E-03	1,07E-02	-	-	-
NM VOC	-2,60E+00	5,71E-01	8,07E-01	-	-	-	-6,08E+00	1,33E+00	1,88E+00	-	-	-
NO _x	-6,13E-01	2,74E-01	4,55E-01	-	-	-	-1,43E+00	6,39E-01	1,06E+00	-	-	-
SO ₂	-9,79E-01	4,68E-01	7,82E-01	-7,42E-02	1,63E-02	2,31E-02	-2,28E+00	1,09E+00	1,83E+00	-1,73E-01	3,80E-02	5,38E-02
Staub	-3,24E-01	3,07E-01	4,34E-01	-	-	-	-7,56E-01	7,15E-01	1,01E+00	-	-	-

Tabelle 4.14: Einsparung bei Treibstoffbereitstellung und Betrieb von Pkw mit Dieselmotor über die gesamte Laufleistung. Angegeben sind Mittelwert $\langle x \rangle$, Standardabweichung des Mittelwertes m und Standardabweichung s von Energiebedarf und Emissionen für die Leichtbaugrade φ von 15% und 35% Massenreduktion der Rohkarosserie.

	Mittelklasse, $\varphi=15\%$, Dieselmotor						Mittelklasse, $\varphi=35\%$, Dieselmotor					
	Kraftstoffbereitstellung			Betrieb			Kraftstoffbereitstellung			Betrieb		
	$\langle x \rangle$	m	s	$\langle x \rangle$	m	s	$\langle x \rangle$	m	s	$\langle x \rangle$	m	s
Energieträger	[MJ/225 000km]			[MJ/225 000km]			[MJ/225 000km]			[MJ/225 000km]		
Rohöl	-1,96E+04	4,14E+03	6,20E+03	-	-	-	-4,57E+04	9,65E+03	1,45E+04	-	-	-
Diesel	1,78E+04	0,00E+00	0,00E+00	-1,78E+04	3,67E+03	5,58E+03	4,16E+04	0,00E+00	0,00E+00	-4,16E+04	8,57E+03	1,30E+04
Em. in Luft	[kg/225 000km]			[kg/225 000km]			[kg/225 000km]			[kg/225 000km]		
CH ₄	-1,81E+00	5,53E-01	6,98E-01	-	-	-	-4,23E+00	1,29E+00	1,63E+00	-	-	-
CO	-2,25E-01	9,11E-02	1,31E-01	-	-	-	-5,24E-01	2,13E-01	3,07E-01	-	-	-
CO ₂	-1,67E+02	4,28E+01	6,35E+01	-1,44E+03	2,97E+02	4,51E+02	-3,90E+02	1,00E+02	1,48E+02	-3,36E+03	6,93E+02	1,05E+03
HCl	-4,39E-03	2,38E-03	2,59E-03	-	-	-	-1,03E-02	5,54E-03	6,05E-03	-	-	-
HF	-4,75E-04	2,57E-04	2,80E-04	-	-	-	-1,11E-03	5,99E-04	6,54E-04	-	-	-
N ₂ O	-3,32E-03	1,80E-03	1,96E-03	-	-	-	-7,75E-03	4,19E-03	4,57E-03	-	-	-
NH ₃	-1,51E-04	8,17E-05	8,91E-05	-	-	-	-3,52E-04	1,91E-04	2,08E-04	-	-	-
NM VOC	-3,47E+00	7,16E-01	1,09E+00	-	-	-	-8,11E+00	1,67E+00	2,54E+00	-	-	-
NO _x	-6,97E-01	2,14E-01	3,13E-01	-	-	-	-1,63E+00	4,99E-01	7,30E-01	-	-	-
SO ₂	-1,02E+00	3,13E-01	4,58E-01	-6,49E-01	1,34E-01	2,03E-01	-2,38E+00	7,31E-01	1,07E+00	-1,51E+00	3,12E-01	4,74E-01
Staub	-7,49E-01	4,05E-01	4,42E-01	-	-	-	-1,75E+00	9,45E-01	1,03E+00	-	-	-

	Oberklasse, $\varphi=15\%$, Dieselmotor						Oberklasse, $\varphi=35\%$, Dieselmotor					
	Kraftstoffbereitstellung			Betrieb			Kraftstoffbereitstellung			Betrieb		
	$\langle x \rangle$	m	s	$\langle x \rangle$	m	s	$\langle x \rangle$	m	s	$\langle x \rangle$	m	s
Energieträger	[MJ/250 000km]			[MJ/250 000km]			[MJ/250 000km]			[MJ/250 000km]		
Rohöl	-1,85E+04	2,62E+03	3,11E+03	-	-	-	-4,32E+04	6,12E+03	7,25E+03	-	-	-
Diesel	1,68E+04	0,00E+00	0,00E+00	-1,68E+04	2,26E+03	2,72E+03	3,93E+04	0,00E+00	0,00E+00	-3,93E+04	5,27E+03	6,34E+03
Em. in Luft	[kg/250 000km]			[kg/250 000km]			[kg/250 000km]			[kg/250 000km]		
CH ₄	-1,71E+00	4,48E-01	4,74E-01	-	-	-	-4,00E+00	1,05E+00	1,11E+00	-	-	-
CO	-2,12E-01	7,94E-02	1,10E-01	-	-	-	-4,95E-01	1,85E-01	2,57E-01	-	-	-
CO ₂	-1,58E+02	3,21E+01	4,25E+01	-1,36E+03	1,83E+02	2,20E+02	-3,68E+02	7,48E+01	9,93E+01	-3,18E+03	4,26E+02	5,13E+02
HCl	-4,15E-03	2,15E-03	2,18E-03	-	-	-	-9,69E-03	5,01E-03	5,09E-03	-	-	-
HF	-4,49E-04	2,32E-04	2,36E-04	-	-	-	-1,05E-03	5,42E-04	5,50E-04	-	-	-
N ₂ O	-3,14E-03	1,62E-03	1,65E-03	-	-	-	-7,32E-03	3,79E-03	3,85E-03	-	-	-
NH ₃	-1,43E-04	7,39E-05	7,50E-05	-	-	-	-3,33E-04	1,72E-04	1,75E-04	-	-	-
NM VOC	-3,28E+00	4,40E-01	5,30E-01	-	-	-	-7,66E+00	1,03E+00	1,24E+00	-	-	-
NO _x	-6,58E-01	1,74E-01	2,37E-01	-	-	-	-1,54E+00	4,06E-01	5,54E-01	-	-	-
SO ₂	-9,65E-01	2,54E-01	3,47E-01	-6,13E-01	8,23E-02	9,91E-02	-2,25E+00	5,94E-01	8,09E-01	-1,43E+00	1,92E-01	2,31E-01
Staub	-7,08E-01	3,66E-01	3,72E-01	-	-	-	-1,65E+00	8,55E-01	8,67E-01	-	-	-

4.2.4 Entsorgung und Recycling

Die Entsorgung ausgedienter Pkw geschieht zu etwa 70% über die Altfahrzeugverwerter. Etwa 10% werden über Schrotthändler entsorgt, 5% direkt bei den Shredderbetrieben abgeliefert und die restlichen 15% werden exportiert⁷ [71]. Abbildung 4.5 gibt einen Überblick über den derzeitigen Ablauf der Altfahrzeugentsorgung. Beim Altfahrzeugverwerter werden zunächst einzelne Bauteile zur Weiterverwendung demontiert. Betroffen sind vor allem Baugruppen wie Motor, Getriebe, Anlasser, Lichtmaschine, Kühler, Felgen, aber auch einige Karosserieblechteile [39]. Dadurch entsteht ein Allokationsproblem. In der Nutzungsphase wird der Ersatzteilbedarf an Karosserieteilen durch Unfall und Korrosion vernachlässigt wie in Abschnitt 4.1 erläutert. Die demontierten Karosseriebleche werden für diesen Zweck eingesetzt und decken einen Teil des entstehenden Bedarfs ab. Folge-

⁷Die Zahlen geben den Stand von 1993 wieder. Mit Inkrafttreten der Altfahrzeugverordnung, voraussichtlich im April 1998, erfolgt die Entsorgung über lizenzierte Verwertungsbetriebe.

richtig werden daher keinerlei Gutschriften für die Wiederverwendung von gebrauchten Karosserieblechen erteilt.

Parallel zur Teildemontage des Fahrzeugs erfolgt eine Trockenlegung, bei der nach heutigem Stand der Technik 70% (Vol.) der flüssigen Betriebsstoffe entfernt werden [71]. Das trockengelegte Restfahrzeug wird dann dem Shredder zugeführt. In den Shredderbetrieben wird das Einsatzmaterial in Hammernmühlen in etwa faustgroße Stücke gerissen. Mit Hilfe eines Windsichters wird danach zunächst der flugfähige Anteil ausgetragen. Über einen Magnetscheider wird die Eisenfraktion mit einem hohen Reinheitsgrad von etwa 98% abgetrennt und stellt daher einen bevorzugten Kühlschrott für den Blasstahlkonverter dar [73]. Nach [39] wird etwa 90% des Eiseneintrages im Shredder zurückgewonnen. Aus dem verbliebenen Rest wird nun mit weiteren Trennverfahren die Nichteisenfraktion abgetrennt. Nach [74] gehen im Shredder etwa 15% der Aluminiumfraktion verloren.

Probleme bereitet, bei einem Entsorgungsablauf nach Abbildung 4.5, die Anwesenheit von PCB und Kohlenwasserstoffen in den zu deponierenden Shredderrückständen [71, 72]. Da der hier betrachtete Bilanzgegenstand, die unlackierte Rohkarosserie, als rein metallische Komponente dazu nicht beiträgt, wird dieser Frage hier nicht weiter nachgegangen.

Um das Shreddern der Rohkarosserien in die Prozeßkette aufnehmen zu können, wird die Modellannahme getroffen, daß der Aufwand für die Stahl- und Aluminiumvariante gleich groß ist. Für das Shreddern der Aluminiumrohkarosserie wird also beispielsweise der gleiche Energiebedarf wie beim Shreddern der Stahlkarosserie angenommen. Einzig die Rück-

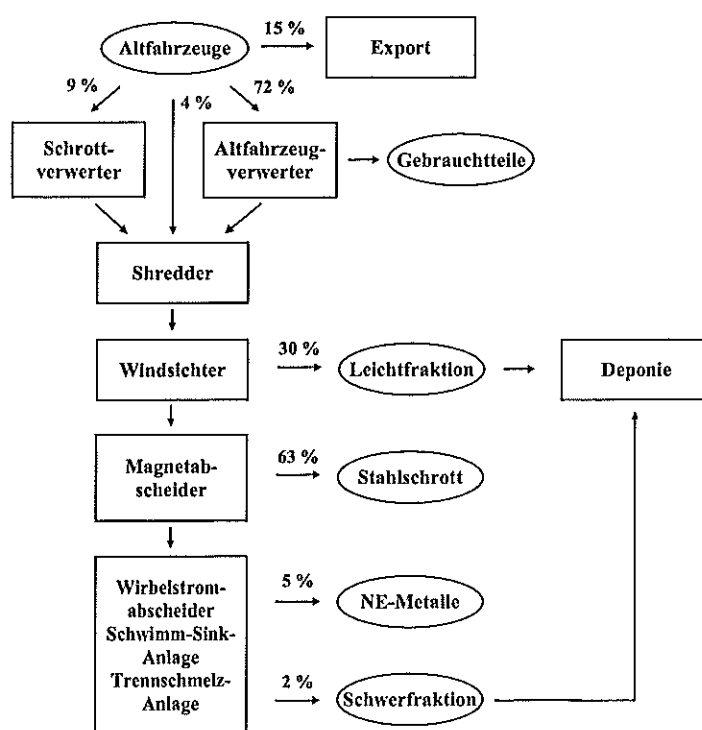


Abbildung 4.5: Ablauf der Altfahrzeugentsorgung (Stand 1993) nach [39, 71, 72].

gewinnungsraten mit 90% bei Stahl bzw. 85% bei Aluminium unterscheiden sich. Damit wird auch die Allokationsfrage, welcher Anteil der Shredderaufwendungen den Karosserien zuzurechnen sei, obsolet. Da beide Karosserievarianten immer gleich belastet werden, ist die Allokation für ihren Vergleich ohne Einfluß. Der Energieeinsatz des Shredder wird vollständig den Karosserien angelastet. Die Deponierung der geringen Anteile an Stahl und Aluminium im Rückstand wird nicht einbezogen. Die prozeßbedingten Emissionen sind nicht bekannt, dürften sich aber sehr ähnlich sein und sind damit für den Vergleich von geringer Relevanz. Die Einzelprozeßdaten für das Shreddern lassen sich Tabelle 4.15 entnehmen.

Tabelle 4.15: Prozeßspezifische Daten des Shredderns von Altkarosserien. Angegeben sind Mittelwert $\langle x \rangle$, Standardabweichung s und Standardabweichung des Mittelwertes m . Die Daten entstammen ZAE [39], Krone [75] und Rink [74].

Energieträger	$\langle x \rangle$ MJ/kg	m MJ/kg	s MJ/kg	n	ZAE MJ/kg	Krone MJ/kg	Rink MJ/kg
Strom UCPTB	2,56E-01	1,67E-01	2,36E-01	2	8,97E-02	4,23E-01	-
Öl S ⁹⁾	1,09E-02	5,46E-03	5,46E-03	1	(b) 1,09E-02	-	-
thermisch ¹⁾	1,09E-02	5,46E-03	5,46E-03	1	(b) 1,09E-02	-	-
Materialbedarf	kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg
Kar. Alu. ²⁾	1,18E+00	5,88E-01	5,88E-01	1	-	-	1,18E+00
Kar. Stahl ²⁾	1,11E+00	5,56E-01	5,56E-01	1	-	-	1,11E+00
Schrott	-1,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1	-	-	-
Em. in Luft	kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg
C2F6	-	-	-	0	-	-	-
CF4	-	-	-	0	-	-	-
CH4	-	-	-	0	-	-	-
CO	-	-	-	0	-	-	-
CO2	-	-	-	0	-	-	-
HCl	-	-	-	0	-	-	-
HF	-	-	-	0	-	-	-
N2O	-	-	-	0	-	-	-
NH3	-	-	-	0	-	-	-
NM VOC	-	-	-	0	-	-	-
NOx	-	-	-	0	-	-	-
SO2	-	-	-	0	-	-	-
Staub	2,32E-06	1,16E-06	1,16E-06	1	-	2,32E-06	-
	kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg
St.-Abfall ³⁾	1,11E-01	5,56E-02	5,56E-02	1	-	-	1,11E-01
Al.-Abfall ³⁾	1,76E-01	8,82E-02	8,82E-02	1	-	-	1,76E-01

¹⁾ Berechnung aus Primärenergieangaben mit Bereitstellungsnutzungsgrad $\eta = 0,9$.

²⁾ Aluminiumkarosserie

³⁾ Stahlkarosserie

⁴⁾ Karosseriestahl in Shredderleichtfraktion bei Stahlrohrkarosserien

⁵⁾ Karosserieteile in Shredderleichtfraktion bei Aluminiumrohrkarosserien

Angesichts der relativ hohen Rückgewinnungsraten der metallischen Rohstoffe im Shredderprozeß stellt sich die Frage, inwieweit diesen Sekundärrohstoffen Stoff- und Energieströme der vorgelagerten Prozeßkette angelastet werden können. Am einfachsten läßt sich ein solches Allokationsproblem auflösen, wenn der Sekundärrohstoff wieder originär in der Herstellungsprozeßkette einsetzbar ist. Daher wird zunächst der technischen Realisierbarkeit dieser Option nachgegangen.

Im Grunde ergibt sich bei beiden Werkstoffen ein ähnliches Problem: durch die Vermischung mit anderen Metallen steigt der Gehalt an unerwünschten Legierungselementen über die zulässigen Grenzen für Karosserieblechqualitäten an.⁸ Nach [76] ist der Einsatz der Eisenfraktion aus dem Shredder als Kühlschrott im Stahlkonverter möglich. Bei

⁸Im Falle des Aluminiums verstärken Abbrandverluste diesen Effekt. Aufgrund seiner hohen Affi-

Schrottzugaben von maximal 20 bis 25% sind Tiefziehqualitäten erzielbar. Die Herstellung von Tiefziehgütern aus Schredderschrott im Elektrolichtbogenofen ist hingegen nicht möglich [76, 34]. Der in der Prozeßkette zur Herstellung der Stahlrohkarosserie bestehende Bedarf an Kühleisenschrott wird aber bereits durch Neuschrott aus dem Preßwerk abgedeckt, wie in Abschnitt 4.2.1 diskutiert. Eine Verwendung innerhalb des Bilanzraumes scheidet damit aus.

Beim Shreddern konventioneller Pkw fällt die Aluminiumfraktion trotz der Einträge durch Fremdstoffe in der erforderlichen Qualität für Gußlegierungen, wie sie im Pkw-Bau typischerweise verwendet werden, an. Dies liegt daran, daß ein etwa 30%iger Anteil an wesentlich niedriger legierten Aluminium-Knetlegierungen diese Verunreinigungen hinreichend verdünnt [74]. Eine Aluminiumrohkarosserie besteht aber ganz überwiegend aus Knetlegierungen. Deren Qualitätsanforderungen kann die Shredderaluminiumfraktion im allgemeinen nicht erfüllen. In [65] werden daher als Entsorgungslösung für den Audi A8 Demontagen und Trennungen verschiedenen Umfangs von Knet- und Gußlegierungen vor dem Shreddern diskutiert. Alternativ wird auch der Einsatz neuer Sortiertechniken nach dem Shreddern in Aussicht gestellt. Diese Verfahren stehen jedoch großtechnisch noch nicht zur Verfügung [66]. Bei einer vollständigen Trennung zwischen Guß- und Knetlegierungen des Audi A8 könnte aus dem Knetgemisch unter Zugabe von 25% Primäraluminium wieder eine Karosserieblechlegierung hergestellt werden [65]. Damit wäre die Einkopplung dieser Fraktion in den Prozeß der Walzbarrenherstellung denkbar. Dieses Potential wird aber durch das Einbringen von Neuschrotten bereits ausgeschöpft, wie in Abschnitt 4.2.2 diskutiert wird. Die vollständige Separierung der Knetschrotte erscheint darüber hinaus nicht besonders realistisch. Beläßt man nur ein Viertel der Gußteile in der zu shreddernden Karosserie, wird bereits ein Neumaterialeinsatz von 40% erforderlich [65]. Eine Rückführung innerhalb des Bilanzraumes scheidet damit aus.

Daraus ergibt sich nun für beide Karosserievarianten ein bedeutendes Allokationsproblem. Für diese Fallstudie wird in einem Basiszenario die für die Rohkarosserien ungünstige Möglichkeit gewählt, bei der dem Schrott keinerlei Anteile an den Stoff- und Energieströmen der vorgelagerten Prozeßkette angelastet wird. Die günstigste Alternative wäre eine Substitutionsgutschrift, bei der die durch Ersatz von Neumaterial in der Prozeßkette eines anderen Produkts eingesparten Stoff- und Energieströme der Rohkarosserie zugerechnet werden. Um die Auswirkungen dieser Allokationsbreite aufzeigen zu können, müssen die Recyclingprozesse abgebildet werden. Dann wird formal der Sekundärwerkstoff anstelle des Primärwerkstoffs in die Prozeßkette der Herstellung eingekoppelt, wie die gestrichelten Verknüpfungen in den Abbildungen 4.1 (S. 54) und 4.2 (S. 55) andeuten. Dieses Vorgehen entspricht näherungsweise einer vollständigen Substitutionsgutschrift. Die Datenbasis zur Sekundäraluminiumherstellung reicht für eine Fehlerabschätzung nicht aus, es können nur Einzelwerte angegeben werden. Die Auswirkungen der beiden Allokationsmöglichkeiten auf die Mittelwerte lassen sich jedoch durch Szenarienrechnungen aufzeigen und mit der statistischen Streuung innerhalb des Basisfalls vergleichen. Auf eine Fehlerabschätzung für die Elektrostahlerzeugung wird konsequenterweise ebenfalls

nität zu Sauerstoff treten bei Schmelzprozessen Reaktionen mit der Umgebungsluft auf. Aluminium wird emittiert und die Legierungselemente verbleiben in der Schmelze.

verzichtet.

Abgesehen vom Kühlschrott findet Schrottreycling vor allem bei der Elektrostahlerzeugung im *Elektrolichtbogenofen* statt. Als Einsatzmaterial eignet sich Schrott, Eisenschwamm und Roheisen in beliebiger Zusammensetzung. Die Energieübertragung findet durch einen Lichtbogen statt, der sich im Ofen zwischen den Kohlelektroden bildet. Es entstehen Temperaturen bis zu 3500°C, so daß jede mögliche Stahlsorte geschmolzen werden kann. Ein zusätzliches Einblasen von Sauerstoff oder Brennstoffen ist nicht notwendig, verkürzt aber die Einschmelzphase [45]. Die zu diesem Prozeß erhobenen Daten finden sich in Tabelle 4.16. Als Hilfsprozeß wird noch die Elektrodenherstellung betrachtet. Mit einem Elektrodenverbrauch von etwa 3 kg pro Tonne erzeugten Elektrostahls, besitzt der Prozeß bei weitem nicht die Bedeutung wie bei der Primäraluminiumgewinnung in der Schmelzflußelektrolyse mit grob 450 kg pro Tonne Aluminium. Die Daten dieses Hilfsprozesses sind daher im Anhang in Tabelle C.54 ausgewiesen. Kuppelprodukte entstehen im Elektrostahlwerk in Form von Schlacken und Stäuben. Schlacken können im Straßenbau eingesetzt, Stäube unter günstigen Umständen in den Elektrolichtbogenofen rückgeführt werden [62]. Alle stofflichen und energetischen Aufwendungen dem Elektrostahl zuzuschlagen, stellt daher eine plausible Allokation dar.

Tabelle 4.16: Prozeßspezifische Daten der Elektrostahlerzeugung nach Frischknecht [33], Merten [77], Aichinger [52], Habersatter [10], SRU250 [11], Gemis 2.1 [118], Weber [159], Philipp 96 [151], Gemis 3.0 [62]. Angegeben ist der Mittelwert $\langle x \rangle$.

	$\langle x \rangle$	n	Frischknecht	Merten	Aichinger	Habersatter	SRU250	Gemis 2.1	Weber	Philipp 96	Gemis 3.0
Energieträger	MI/kg		MI/kg	MI/kg	MI/kg	MI/kg	MI/kg	MI/kg	MI/kg	MI/kg	MI/kg
Strom UCPTE	1,92E+00	5	2,59E+00	1,80E+00	1,48E+00	1,94E+00	-	1,80E+00	-	-	-
Steinkohle	2,70E+00	2	-	-	-	-	-	2,48E+00	2,92E+00	-	-
Öl S	1,64E-01	2	-	-	-	-	-	1,23E-01	2,05E-01	-	-
Petrolkoks	9,22E-02	2	-	4,10E-01	8,20E-02	1,02E-01	-	-	-	-	-
thermisch	1,57E+00	4	-	1,33E-01	-	-	-	4,00E-01	2,61E+00	3,13E+00	-
Materialbedarf	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg
Anode ¹⁾	2,70E-03	2	-	(n) 1,20E-02	2,40E-03	3,00E-03	-	-	-	-	-
Brannkalk	3,00E-02	1	-	3,00E-02	-	-	-	-	-	-	-
Kalkstein	1,70E-03	1	-	-	-	-	-	-	-	1,70E-03	-
Legierungen	1,18E-02	1	-	-	-	-	-	-	-	1,18E-02	-
Rohstahl	-1,00E+00	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sauerstoff	1,29E-01	3	-	3,60E-02	-	-	-	1,57E-01	1,93E-01	-	-
Schrott	1,09E+00	5	1,10E+00	1,10E+00	-	1,05E+00	-	1,10E+00	-	1,13E+00	-
Ausbruch	-2,36E-02	1	-	-	-	-	-	-	-	-2,36E-02	-
Schlacke	-5,31E-02	4	-	-5,50E-02	-	-7,50E-02	-4,22E-02	-	-	-4,00E-02	-
Stäube	-2,30E-02	3	-	-1,50E-02	-	-	-3,87E-02	-	-	-1,52E-02	-
Em. in Luft	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg
Abhaft	1,03E-01	1	-	1,03E-01	-	-	-	-	-	-	-
C2F6	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CF4	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
C114	1,20E-04	1	1,20E-04	-	-	-	-	-	-	-	-
CO	4,90E-03	3	-	-	-	1,20E-03	-	2,00E-03	-	-	1,15E-02
CO2 ²⁾	1,98E-02	3	-	(n) 4,40E-02	(b) 8,80E-03	(b) 1,10E-02	-	-	-	-	3,97E-02
HCl	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
HF	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
N2O	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NH3	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NMVOC	5,00E-05	1	5,00E-05	-	-	-	-	-	-	-	-
NOx	1,27E-04	3	2,00E-04	-	-	-	-	1,00E-04	-	-	8,00E-05
SO2	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Staub	1,90E-04	3	1,50E-04	-	-	1,20E-04	-	-	-	-	3,00E-04
Abfall	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg
Abfall	1,99E-03	1	-	-	-	-	-	-	-	1,99E-03	-

¹⁾ Nach Aichinger liegt Anodenverbrauch seit 1965 unterhalb von 6,5 kg, Angaben nach Merten daher nicht berücksichtigt.

²⁾ Aus Anodenverbrauch stöchiometrisch berechnet.

Tabelle 4.17: Prozeßspezifische Daten der Sekundäraluminiumerzeugung mit Salzschlackenaufarbeitung für Altschrotteinsatz nach [75] und eigenen Berechnungen. Angegeben ist der Mittelwert $\langle x \rangle$.

	$\langle x \rangle$	n	Krone	Berechnung
Energieträger	MJ/kg		MJ/kg	MJ/kg
Strom UCPTE	1,48E+00	1	1,48E+00	-
Erdgas ¹⁾	2,55E+00	1	(b) 2,55E+00	-
Öl S ¹⁾	5,96E+00	1	(b) 5,96E+00	-
thermisch	8,51E+00	1	8,51E+00	-
Materialbedarf	kg/kg		kg/kg	kg/kg
Alu. sek. ²⁾	-1,00E+00	1	-	-
Krätze ³⁾	1,07E-01	1	(n) 2,68E-01	(b) 1,07E-01
Legierungen	6,60E-02	1	6,60E-02	-
Schmelzsatz	2,10E-02	1	2,10E-02	-
Schrott ³⁾	1,11E+00	1	(n) 9,52E-01	(b) 1,11E+00
Ausbruch	-2,00E-03	1	-2,00E-03	-
Stäube	-3,00E-02	1	-3,00E-02	-
Em. in Luft	kg/kg		kg/kg	kg/kg
C2F6	-	0	-	-
CF4	-	0	-	-
CH4	2,38E-03	1	2,38E-03	-
CO	4,20E-05	1	4,20E-05	-
CO2	6,38E-01	1	-	(b) 6,38E-01
HCl	1,14E-03	1	1,14E-03	-
HF	2,90E-05	1	2,90E-05	-
N2O	-	0	-	-
NH3	9,00E-06	1	9,00E-06	-
NMVOC	-	0	-	-
NOx	1,90E-03	1	1,90E-03	-
SO2	1,31E-03	1	1,31E-03	-
Staub	3,23E-04	1	3,23E-04	-
	kg/kg		kg/kg	kg/kg
TER ⁴⁾	2,53E-01	1	2,53E-01	-

¹⁾ Verteilung auf Energieträger abgeschätzt nach "Habersatter".
Beitrag zu Primärenergieaufwand, nicht zu Emissionen.

²⁾ Sekundäraluminium verbucht. ³⁾ Aluminiumanteil der Krätze als Schrott verbucht. ⁴⁾ Tonerderückstand

Die *Sekundäraluminiumerzeugung* findet durch Schrotteinschmelzung in der Regel im Drehtrommelofen unter einer Salzdecke statt [75]. Das Schmelzsatz besteht aus Natriumchlorid, Kalziumchlorid und geringen Mengen Kalziumfluorid. Die in großen Mengen anfallende Salzschlacke wird in Deutschland wiederaufgearbeitet, im Ausland jedoch teilweise noch deponiert [60]. Hier wird von einer Wiederaufarbeitung der Salzschlacke nach [75] ausgegangen und in den Prozeß „Sekundäraluminiumerzeugung“ einbezogen. Die verbliebenen geringen Einsatzmengen an Schmelzsatz werden nicht weiter verfolgt. Die Bilanzierung basiert auf [75], wobei die dortigen Angaben auf 100% Altschrott umgerechnet wurden. Die Daten finden sich in Tabelle 4.17.

4.2.5 Energiebereitstellung

Unverzichtbarer Bestandteil einer ganzheitlichen Bilanzierung ist die Einbeziehung der Prozeßketten zur Bereitstellung von Prozeßwärme und elektrischer Energie, tragen sie

doch maßgeblich zu Ressourcenabbau und Emissionen bei. Benötigt wird also ein Modell, welches verbrannte Energieträger und eingesetzte elektrische Energie mit Rohstoffverbrauch und Emissionen verknüpft.

Betrachtet man die Bereitstellung von Wärme oder Elektrizität vom Rohstoff ausgehend, so wird schnell klar, daß für jeden Energieträger Prozeßketten berechnet werden müssen, von denen jede einzelne in ihrer Komplexität mit denen der Stahl- bzw. Aluminiumkarosserie vergleichbar ist. Um den Aufwand zu begrenzen, wird auf bereits existierende Prozeßketten zurückgegriffen und diese mit abschätzenden Fehlerbestimmungen versehen. Die Bilanzierung basiert dabei auf [33], da dort alle benötigten Prozeßketten bereitgestellt werden und eine breite Datenbasis zusammengetragen wurde, die eine Abschätzung der Streuungen erst ermöglicht.

Die Streuungsgrößen Standardabweichung s und Standardabweichung des Mittelwertes m werden dabei überwiegend mit zwei Methoden abgeschätzt. Wenn der Prozeß i in der Prozeßkette als dominante Quelle für Datenschwankungen identifiziert werden kann, werden für diesen die relativen Streuungsgrößen $\frac{m_{x_i}}{\bar{x}_i}$ und $\frac{s_{x_i}}{\bar{x}_i}$ bestimmt. Diese relativen Streuungen werden für den Bilanzwert der Prozeßkette $\bar{x}_{PK}$ übernommen:

$$\begin{aligned}\frac{m_{x_{PK}}}{\bar{x}_{PK}} &= \frac{m_{x_i}}{\bar{x}_i}, \\ \frac{s_{x_{PK}}}{\bar{x}_{PK}} &= \frac{s_{x_i}}{\bar{x}_i}.\end{aligned}$$

Dies stellt eine konservative Abschätzung dar, denn die Streuung der Einzelprozesse wird nach dem Fehlerfortpflanzungsgesetz quadratisch aufsummiert:

$$m_{x_{PK}}^2 = \sum_j m_{x_j}^2.$$

Damit ergibt sich für ein dominantes m_{x_i}

$$m_{x_{PK}} \approx m_{x_i},$$

woraus unmittelbar unter der schwachen Voraussetzung $|\bar{x}_i| \leq |\bar{x}_{PK}|$ folgt:

$$\frac{m_{x_{PK}}}{|\bar{x}_{PK}|} \approx \frac{m_{x_i}}{|\bar{x}_{PK}|} \leq \frac{m_{x_i}}{|\bar{x}_i|}.$$

Liegen länderspezifische Daten vor und werden die Streuungen von den unterschiedlichen Rahmenbedingungen, wie beispielsweise Transportdistanzen oder unterschiedliche technische Ausführungen, maßgeblich beeinflußt, so können die Streumaße des gewichteten Mittelwertes zugrundegelegt werden.

Die räumlichen und zeitlichen Bilanzgrenzen in [33] sind so gewählt, daß die ausgewählten Module die Situation im UCPTE-Raum des Jahres 1990 wiedergeben. Damit werden die Länder Belgien, Deutschland (alte Bundesländer), Dänemark, Frankreich, Großbritannien, Italien, Luxemburg, Ex-Jugoslawien, Niederlande, Österreich, Portugal, Spanien und Schweiz erfaßt. Für die Zusammensetzung von UCPTE-Strombezug wird eine aktuelle Verteilung mit dem Bezugsjahr 1993 nach [11] zugrundegelegt.

Feuerungsprozesse

Um die Prozesse für die Bereitstellung von Prozeßwärme angemessen zu berücksichtigen, werden industrielle Feuerungsprozesse basierend auf [33] abgebildet. Dabei werden die für europäische Industriefeuerungen ermittelten Werte als Mittelwert übernommen. Zusätzlich wird eine Fehlerabschätzung vorgenommen.

Die Prozeßketten von Heizöl schwer („Öl S“) und extraleicht („Öl EL“) sowie von Erdgas und Steinkohle umfassen Rohstoffförderung, Aufbereitung, Transport, Bau der Anlagen, Entsorgungsprozesse sowie Verbrennung des Energieträgers. Hochofengas und Koksofengas fallen als Kuppelprodukte innerhalb der Prozeßkette zur Stahlerzeugung an. Daher ist die Bereitstellung dort bereits berücksichtigt, und hier wird nur die Verbrennung bilanziert.

Tabelle 4.18 gibt eine Übersicht über die ausgewählten Emissionsfaktoren und den Primärenergiebedarf bei den Industriefeuerungen. Der Bedarf an Baustoffen und ähnlichen, der in [33] mit bilanziert wird, wird hier nicht weiter verfolgt. Ebenso wird der Bedarf an Energieträgern neben dem Hauptenergieträger vernachlässigt, da dieser in der Regel lediglich im Bereich einiger Prozent liegt [33]. Die in Tabelle 4.18 angegebenen Emissi-

Tabelle 4.18: Für dieses Studie ausgewählte Emissionsfaktoren und Primärenergiebedarf für Industriefeuerungen nach Angaben in [33]. Alle Werte beziehen sich auf 1 MJ verbrannter Energieträger, auf Basis des unteren Heizwertes und schließen Bereitstellung und Verbrennung ein. Angegeben sind Mittelwert $\langle x \rangle$, Standardabweichung des Mittelwertes m , Standardabweichung s sowie Umfang der Datenbasis n .

	Steinkohle				Erdgas				Öl S			
	$\langle x \rangle$	m	s	n	$\langle x \rangle$	m	s	n	$\langle x \rangle$	m	s	n
Energieträger	MJ/MJ	MJ/MJ	MJ/MJ		MJ/MJ	MJ/MJ	MJ/MJ		MJ/MJ	MJ/MJ	MJ/MJ	
Steinkohle	1,55E+00	2,61E-01	2,61E-01	2	-	-	-	0	-	-	-	0
Erdgas	-	-	-	0	1,07E+00	2,32E-03	5,20E-03	6	-	-	-	0
Öl	-	-	-	0	-	-	-	0	1,21E+00	1,05E-01	1,05E-01	1
Em. in Luft	kg/MJ	kg/MJ	kg/MJ		kg/MJ	kg/MJ	kg/MJ		kg/MJ	kg/MJ	kg/MJ	
CH ₄	4,02E-04	4,03E-05	1,34E-04	12	1,82E-04	4,52E-05	9,84E-05	10	1,22E-04	2,75E-05	2,75E-05	3
CO	1,09E-04	5,43E-05	5,43E-05	1	2,73E-05	1,37E-05	1,37E-05	1	3,40E-05	1,70E-05	1,70E-05	1
CO ₂	9,81E-02	6,48E-04	1,30E-03	4	6,44E-02	4,92E-04	1,10E-03	4	9,56E-02	5,51E-04	1,46E-03	7
HCl	5,08E-05	2,54E-05	2,54E-05	1	4,30E-07	2,15E-07	2,15E-07	1	2,29E-06	1,44E-06	1,44E-06	3
HF	1,87E-06	9,35E-07	9,35E-07	1	4,52E-08	2,26E-08	2,26E-08	1	3,44E-08	1,72E-08	1,72E-08	1
N ₂ O	1,21E-06	6,04E-07	6,04E-07	1	6,89E-07	3,44E-07	3,44E-07	1	2,08E-06	1,04E-06	1,47E-06	2
NH ₃	5,75E-08	2,87E-08	2,87E-08	1	9,75E-09	4,88E-09	4,88E-09	1	1,97E-08	9,87E-09	9,87E-09	1
NM VOC	1,30E-05	6,50E-06	6,50E-06	1	9,52E-06	4,52E-05	9,84E-05	1	2,16E-04	1,14E-04	1,14E-04	1
NO _x	2,44E-04	3,53E-05	1,00E-04	8	5,74E-05	1,91E-05	1,91E-05	2	2,44E-04	2,75E-05	6,15E-05	5
SO ₂	5,59E-04	3,88E-05	1,03E-04	7	3,98E-05	1,35E-05	1,35E-05	6	1,31E-03	3,13E-04	8,29E-04	7
Staub	1,10E-04	5,48E-05	5,48E-05	1	1,79E-05	8,97E-06	8,97E-06	1	9,98E-05	4,99E-05	4,99E-05	1

	Öl EL				Koksgas				Gichtgas			
	$\langle x \rangle$	m	s	n	$\langle x \rangle$	m	s	n	$\langle x \rangle$	m	s	n
Energieträger	MJ/MJ	MJ/MJ	MJ/MJ		MJ/MJ	MJ/MJ	MJ/MJ		MJ/MJ	MJ/MJ	MJ/MJ	
Steinkohle	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Erdgas	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Öl	1,08E+00	4,19E-02	4,19E-02	1	-	-	-	0	-	-	-	0
Em. in Luft	kg/MJ	kg/MJ	kg/MJ		kg/MJ	kg/MJ	kg/MJ		kg/MJ	kg/MJ	kg/MJ	
CH ₄	1,03E-04	2,31E-05	2,31E-05	3	1,00E-06	5,00E-07	5,00E-07	1	1,00E-06	5,00E-07	5,00E-07	1
CO	2,81E-05	1,41E-05	1,41E-05	1	2,00E-05	1,00E-05	1,00E-05	1	2,00E-05	1,00E-05	1,00E-05	1
CO ₂	8,43E-02	4,54E-04	1,11E-03	6	4,40E-02	4,95E-04	8,57E-04	1	2,60E-01	2,92E-03	5,06E-03	1
HCl	3,29E-07	2,06E-07	2,06E-07	3	4,30E-07	2,15E-07	2,15E-07	1	4,30E-07	2,15E-07	2,15E-07	1
HF	3,44E-08	1,72E-08	1,72E-08	1	4,52E-08	2,26E-08	2,26E-08	1	4,52E-08	2,26E-08	2,26E-08	1
N ₂ O	8,75E-07	4,37E-07	4,37E-07	1	5,00E-07	2,50E-07	2,50E-07	1	5,00E-07	2,50E-07	2,50E-07	1
NH ₃	9,50E-09	4,75E-09	4,75E-09	1	9,75E-09	4,88E-09	4,88E-09	1	9,75E-09	4,88E-09	4,88E-09	1
NM VOC	1,93E-04	1,02E-04	1,02E-04	1	4,00E-06	2,00E-06	2,00E-06	1	4,00E-06	2,00E-06	2,00E-06	1
NO _x	1,24E-04	1,62E-05	2,80E-05	3	1,50E-04	5,00E-05	5,00E-05	1	8,00E-05	2,67E-05	2,67E-05	1
SO ₂	1,31E-04	3,07E-05	6,14E-05	4	5,10E-05	3,90E-05	5,52E-05	2	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1
Staub	4,26E-05	2,13E-05	2,13E-05	1	2,00E-06	1,00E-06	1,00E-06	2	2,00E-06	1,00E-06	1,00E-06	2

Tabelle 4.19: Untere Heizwerte von Primärenergieträgern, die zur primärenergetischen Bewertung herangezogen werden. Die Angaben beziehen sich auf den Einsatz von 1 MJ des jeweiligen Energieträgers.

Primärenergieträger	unterer Heizwert
Rohfördersteinkohle	27,1 MJ/kg
Rohbraunkohle	8,4 MJ/kg
Rohgas	35,5 MJ/m ³
Rohöl	42,5 MJ/kg

onsfaktoren und Primärenergieaufwendungen basieren auf folgenden Modulen in [33]:

Industriefeuerung Öl S: „Nutzwärme ab Industriefeuerung S Euro“,
 Industriefeuerung Öl EL: „Nutzwärme ab Industriefeuerung EL, CII“,
 Industriefeuerung Erdgas: „Erdgas in Industriefeuerung > 100 kW Euro“,
 Industriefeuerung Steinkohle: „Industriekohlefeuerung 1-10 MW“.

Während die Module zur Kohle- und Gasfeuerung eingangsseitig auf die Menge verbrannten Energieträgers bezogen sind, sind die Ölf Feuerungen ausgangsseitig auf die erzeugte Menge Nutzwärme normiert. Da bei den Einzelprozessen der Energiebedarf ermittelt wird, erweist sich ein eingangsseitiger Bezug als sinnvoller. Die Prozeßketten der Ölf Feuerungen werden daher um den von [33] zugrundegelegten Wirkungsgrad von $\eta = 0,85$ korrigiert. In [33] werden keine direkten Module zur Verbrennung von Hochofengas und Koksofengas bereitgestellt. Für die Emissionen von Kohlendioxid, Kohlenmonoxid, Schwefeloxide sowie Stickoxide werden aber Angaben gemacht. Für die anderen Emissionen werden die angegebenen Standardwerte für die Verbrennung von Brenngasen übernommen. Im folgenden werden nun die einzelnen Emissionen, der Primärenergiebedarf und ihre Fehlerabschätzung diskutiert.

Primärenergie

Abweichend zu [33] wird hier eine primärenergetische Bewertung der verbrauchten Energieträger vorgenommen. Die Bewertung des Verbrauchs wird auf Basis des mittleren unteren Heizwertes nach [33] vorgenommen. Die verwendeten Heizwerte zeigt Tabelle 4.19. Die Ableitung der Standardabweichungen erfolgt in Anhang D.1. Die Energieträger Koksofengas und Hochofengas werden nicht primärenergetisch bewertet, da sie als Kuppelprodukte in der Prozeßkette der Stahlkarosserieherstellung anfallen.

Methan (CH₄) und NMVOC

Bei den Energieträgern Öl, Steinkohle und Erdgas dominiert eindeutig die Emission bei

Tabelle 4.20: Bandbreiten der CH₄- und NMVOC-Emissionen nach [78] für Ölförderung und Aufbereitung in der Raffinerie. Die hier ermittelte relative Streuung wird für die Gesamtemission übernommen.

	Minimum	$\frac{m^3}{a}$	Maximum	$\frac{m^3}{a}$	Mittelwert	$\frac{m^3}{a}$	$\frac{m_x}{\bar{x}} = \frac{s_x}{\bar{x}}$	n
Methan	5,98 · 10 ⁹		15,74 · 10 ⁹		10,86 · 10 ⁹		0,45	3
NMVOC	6,18 · 10 ⁹		20,06 · 10 ⁹		13,14 · 10 ⁹		0,53	3

Tabelle 4.21: Bandbreiten der Methanemissionen bei der Erdgasbereitstellung nach verschiedenen Quellen in [33]. Den Prozentangaben liegt als Bezugsgröße die Menge an produziertem Erdgas zugrunde.

	Ferntransport	Förderung	Σ
$\bar{x}$ [%]	1,89	1,81	3,70
$m_x/\bar{x}$	0,68	0,46	0,42
$s_x/\bar{x}$	0,89	0,88	0,63
n	10	4	7,06
Quellen			
Chem. Syst. 89 [79] [%]	1,8 - 2,1	–	
Merenkov 91 [80] [%]	1,2 - 2,1	–	
DGMK 92 [81] [%]	0,07	0,25	
Korchemkin 89 [82] [%]	1 - 3	–	
Pospischill 93 [83] [%]			
Bashmakov 92 [84] [%]	1 - 6	1,8 - 4,5	
Arbatov 91 [85] [%]			
Fritsche 92 [98] [%]	0,3	0,7	

der Förderung [33]. Im Falle des Erdgas spielen Leckagen beim Ferntransport noch eine vergleichbare Rolle. Für diese Energieträger werden daher die Streuungsparameter für diesen Teil der Prozeßkette abgeschätzt. Die relativen Standardabweichungen werden dann, wie eingangs erläutert, für die Gesamtemission übernommen.

Für die Ölförderung wird eine der Quellen zugrundegelegt, auf die sich auch [33] maßgeblich stützt. [78] schätzt dort die Bandbreiten an Methan- und NMVOC-Emissionen aus Förderung und Raffinerie ab. Die Werte in Tabelle 4.20 werden wie eine Bereichsangabe mit Mittelwert gemäß der in Abschnitt 3.2.2 erläuterten Methoden behandelt.

Für den Energieträger Erdgas stellt [33] Werte für Förderung und Ferntransport aus verschiedenen Quellen zur Verfügung. Tabelle 4.21 zeigt die daraus ermittelte relative Streuung für Methan. Dieser Wert wird mangels anderer Daten näherungsweise auch für die NMVOC übernommen. Die Methanemissionen bei der Kohlefeuerung stammen maßgeblich aus der Ausgasung von Untertagebau-Bergwerken. In [33] finden sich spezifische CH_4 -Emissionsfaktoren der Kohle-Herkunftsländer sowie der Anteil am Verbrauch in den UCPTL-Ländern. Über diese Werte wird in Tabelle 4.22 verbrauchsgewichtet gemittelt und die relativen Streuparameter werden abgeschätzt. Die NMVOC-Emissionen stammen nach [33] vorwiegend aus der Verbrennung und gegebenenfalls aus der Kokerei. Für die Verbrennung basiert auch die Bestimmung in [33] nur auf wenigen Anhaltswerten, daher wird dieser Wert hier wie ein Anhaltswert behandelt und entsprechend mit Schätzfehlern von 50% versehen (siehe Abschnitt 3.2.2).

Für die Verbrennung von Hochofengas und Koksofengas geben sowohl [33] als auch [52] nur Anhaltswerte an, dementsprechend wird auch hier für Methan und NMVOC ein Schätzfehler von 50% angesetzt.

Tabelle 4.22: Methanemission in kg pro Tonne verwertbare Förderung der Steinkohleförderung nach [33].

	[kg/tvF]	Anteil an Verbrauch
$\bar{x}$	20,06	
$m_x/\bar{x}$	0,01	
$s_x/\bar{x}$	0,33	
n	12	
Belgien	25	0,015
Deutschland	25	0,484
Frankreich	25	0,061
Spanien	12,5	0,078
Österreich	10	0,026
China	25	0,015
Polen	5,7	0,045
Südafrika	9	0,1
Ehem. CSFR	26	0,02
GUS	21	0,027
Großbritannien	19	0,007
USA	17	0,122

Kohlenmonoxid

Kohlenmonoxid entsteht generell bei unvollständiger Verbrennung, der Emissionsfaktor hängt daher stark von der Luftzufuhr der jeweiligen Feuerung ab. Da diese anlagenspezifisch ist, werden die CO-Emissionen als Anhaltswerte behandelt und mit dem Schätzfehler versehen.

Kohlendioxid und Schwefeloxide

Die Streuungen der Emissionsfaktoren lassen sich aus der Streuung des Kohlenstoff- und Schwefelgehalts bestimmen. Die Emissionen streuen näherungsweise in gleicher Weise wie die Brennstoffzusammensetzung. In Tabelle 4.23 wird für schweres und extraleichtes Heizöl der Kohlenstoff- und Schwefelanteil nach verschiedenen Quellen gezeigt und die Streuung daraus abgeschätzt. Beim Erdgasbezug resultieren die SO₂-Emissionen etwa zur Hälfte aus Aufbereitung und Abfackeln von saurem Erdgas sowie aus den nötigen Materialaufwendungen [33]. Die größere Fehlerquelle ist dabei aufgrund der stark schwankenden Erdgasqualitäten in der Aufbereitung und der Abfackelung zu finden. Beim Kohlendioxid dominiert eindeutig die Verbrennung. Daher wird in Tabelle 4.24 über die CO₂-Emissionsfaktoren gemittelt, die in [33] auf Basis des Kohlenstoffgehaltes berechnet wurden. Für die Schwefeldioxidemissionen wird analog über die nach Herkunftsländern spezifischen SO₂-Emissionen aus der Bereitstellung aufbereiteten Erdgases gemittelt. Dabei

Tabelle 4.23: Kohlenstoff- und Schwefelgehalt nach verschiedenen Quellen für Heizöl S und Heizöl EL. Alle Prozentwerte sind in Massenprozenten angegeben. H_u bezeichnet den unteren Heizwert. Die relativen Standardabweichungen dienen zur Abschätzung der Streuungen.

Heizöl S							
	C [%]	S [%]	H_u [MJ/kg]	C ¹⁾ [g/MJ]	S ¹⁾ [g/MJ]	CO ₂ ¹⁾ [g/MJ]	SO ₂ ¹⁾ [g/MJ]
$\bar{x}$						77,8	0,829
$m_x/\bar{x}$						$5,76 \cdot 10^{-3}$	$2,39 \cdot 10^{-1}$
$s_x/\bar{x}$						$1,52 \cdot 10^{-2}$	$6,34 \cdot 10^{-1}$
n						7	7
Baehr [87]	85,3	2,5	40,8	20,9	0,613	76,7	1,23
Baehr [87]	84,9	3,5	40,0	21,2	0,875	77,6	1,75
Raffoil [88]	87,7	0,82	40,3	21,8	0,203	79,8	0,407
GEMIS [89]	84	1,8	39,6	21,2	0,455	77,8	0,909
DGMK [81]	87,5	1	40,7	21,5	0,246	78,8 10	0,491
Hausen [90]	86,4	1,6	41,14	21	0,389	77	0,778
Kraftw. [91]	87,1	0,5	41,7	20,9	0,12	76,6	0,24

Heizöl EL							
	C [%]	S [%]	H_u [MJ/kg]	C ¹⁾ [g/MJ]	S ¹⁾ [g/MJ]	CO ₂ ¹⁾ [g/MJ]	SO ₂ ¹⁾ [g/MJ]
$\bar{x}$						73,8	0,0957
$m_x/\bar{x}$						$5,38 \cdot 10^{-3}$	$2,35 \cdot 10^{-1}$
$s_x/\bar{x}$						$1,32 \cdot 10^{-2}$	$4,69 \cdot 10^{-1}$
n						6	4
Baehr [87]	85	(1) ²⁾	42,7	19,9	0,234	73	–
SIFF [92]	86,2	0,15	42,7	20,2	0,0351	74	0,0703
GEMIS [89]	85,2	0,16	42,8	19,9	0,0374	73	0,0748
DGMK [81]	86,2	0,16	42,8	20,1	0,0374	73,8	0,0748
Hausen [90]	85,9	0,35	42,97	20	0,0815	73,3	0,163
Birnbaum [93]	88	–	42,7	20,6	–	75,6	–

¹⁾Berechnet aus vorstehenden Angaben.
²⁾Geht nicht ein. Nach [86] ist Schwefelgehalt in Heizöl EL über 0,2% unzulässig.

wird nach den Verbrauchsanteilen der Herkunftsländer in den UCPTE-Staaten gewichtet. Die Bildung der Emissionen Kohlendioxid, Schwefeloxide und auch Stickoxide findet beim Energieträger Kohle ganz überwiegend im Verbrennungsprozeß statt [33]. Demzufolge werden die Streuungsmaße in Tabelle 4.25 durch den Vergleich verschiedener Feuerungsanlagen abgeschätzt. Diese Rostfeuerungen zwischen 1 und 10 MW Leistung decken einen grossen Bereich der industriellen Kohlefeuerungen ab. Die Anlagen werden überwiegend ohne Entschwefelungsanlagen betrieben, es kommt daher schwefelarme Kohle zum Einsatz

Tabelle 4.24: CO₂-Emissionsfaktoren von Brenngasen verschiedener Herkunftsländer, berechnet auf Basis des Kohlenstoffgehaltes. Die SO₂-Emissionsfaktoren charakterisieren die Bereitstellung in der Aufbereitung des Gases.

	Anteil UCPTE	CO ₂ [kg/MJ]	SO ₂ [g/m ³]
$\bar{x}$		0,055	0,900
$m_x/\bar{x}$		0,007	0,334
$s_x/\bar{x}$		0,017	0,747
n		6	6
Norwegen	0,09	0,56	0,528
Niederlande	0,32	0,055	0,209
Deutschland	0,21	0,055	1,99
GUS	0,23	0,053	1,22
Algerien	0,06	0,055	0,571
Algerien, Flüssiggas	0,09	0,055	0,594
Rest ¹⁾	0,12	—	—
¹⁾ Überwiegend Inlandsförderung in Italien, Frankreich. Wurde deutschem Förderanteil zugeschlagen (siehe auch [33]).			

[33]. Für die Kohlendioxidemissionen der Feuerungen von Hochofengas und Koksofengas werden die Anhaltswerte nach [33] verwendet. Die relative Streuung wird näherungsweise mit der von Erdgas gleichgesetzt, da auch dort die Brenngaszusammensetzung stark streut. Der Schwefelgehalt von Hochofengas wird in [33] mit Null angegeben. Plausibel ist zumindest ein sehr geringer Schwefelgehalt, da im Hochofen bevorzugt schwefelarmer Koks zum Einsatz kommt [45], um den Schwefelgehalt im Roheisen möglichst niedrig zu halten. Weiterhin wird entstehender Schwefel in der Schlacke gebunden oder im Roheisen gelöst. Ein Schwefelgehalt von Null erscheint daher als sinnvolle Näherung, die Streuung ist bei sehr niedrigem Schwefelgehalt ebenfalls vernachlässigbar und wird zu Null angenommen (Tabelle 4.18).

Für die Schwefeloxidemission bei der Verbrennung von Koksofengas gibt [33] die beiden Werte von $9 \cdot 10^{-5}$ kg/MJ und $1,2 \cdot 10^{-5}$ kg/MJ an. Angesichts dieser vergleichsweise kleinen Emissionsfaktoren ist nur ein kleiner Beitrag aus diesem Prozeß zur gesamten Bilanz der Schwefeloxide zu erwarten, so daß eine Abschätzung der Streuung durch Mittelung über diese zwei Werte ausreichend genau erscheint. Es ergibt sich damit für die Streuparameter:

$$m = 3,90 \cdot 10^{-5} \text{ kg/MJ}, \quad n = 2,$$

$$s = 5,52 \cdot 10^{-5} \text{ kg/MJ}, \quad n = 2.$$

Säure-, Lachgas- und Ammoniakemissionen

Die Werte für die Emission von Salzsäure und Flußsäure können im allgemeinen nur als

Tabelle 4.25: Emissionsfaktoren verschiedener Steinkohle-Feuerungsanlagen nach [33]. Über die Daten wird ungewichtet gemittelt, um relative Streuungsmaße zu gewinnen.

[kg/TJ]	CO ₂	NO _x	SO _x
$\bar{x}$	93500	199	617,7
$m_x/\bar{x}$	0,007	0,14	0,07
$s_x/\bar{x}$	0,013	0,41	0,18
n	4	8	7
VEÖ [94]	94000	250	600
OECD [95]	–	329	700
UBA [96]	92300	130	630
UBA [96]	92700	220	400
Fichtner [97]	–	53	760
Fritsche [98]	–	190	584
Torp [99]	9500	200	650
UBA [100]	–	22	–

Anhaltswerte behandelt werden. Demzufolge werden sie mit einem Schätzfehler von 50% versehen.

Einzige Ausnahme bilden die HCl-Emissionen in den Ölf Feuerungen. Hier gibt [33] drei verschiedene Werte für den Chlorgehalt von Öl an. Unter der plausiblen Annahme, daß die Emissionen im wesentlichen mit diesem Chlorgehalt schwanken, ergibt sich aus den drei Werten 12,5 mg/kg, 39,3 mg/kg und 1,81 mg/kg für die relativen Streuungen:

$$\frac{m_x}{\bar{x}} = 0,63,$$

$$\frac{s_x}{\bar{x}} = 1,09.$$

Analog zu den Säureemissionen liegen auch für die Lachgas- und Ammoniakemissionen lediglich Einzelwerte vor, die entsprechend als Anhaltswerte behandelt werden. In diesem Fall stellt lediglich die Lachgasemission bei der Feuerung von Heizöl S eine Ausnahme dar. Hier gibt [33] die beiden Werte von 0,8 kg/TJ und 2,4 kg/TJ an. Mittelung führt zu den relativen Streuparametern:

$$\frac{m_x}{\bar{x}} = 0,50, \quad n = 2,$$

$$\frac{s_x}{\bar{x}} = 0,71, \quad n = 2.$$

Da diese Werte gegenüber dem Schätzfehler eine konservative Abschätzung darstellen, werden sie übernommen.

Tabelle 4.26: Abschätzung der Streuung von Stickoxid-Emissionsfaktoren für industrielle Ölf Feuerungen nach [33].

NO _x [kg/TJ]	$\bar{x}$	$m_x/\bar{x}$	$s_x/\bar{x}$	n	UBA [100]	OECD [101]	BUWAL [102]	VFWL [103]	Veldt [104]	
Heizöl S	195,4	0,11	0,25	5	186	161	–	230	140	260
Heizöl EL	79,3	0,13	0,23	3	70	–	68	–	100	–

Stickoxide

Die Bildung von Stickoxiden hängt stark von Verbrennungsparametern, wie der Temperatur und der Luftzufuhr, ab. Der Verbrennungsprozeß stellt auch die wesentliche Quelle der NO_x-Emissionen in den Prozeßketten der Feuerungen dar. Die Abschätzung der Streuungsparameter beruht daher auf dem Vergleich von Feuerungsemissionen. Für Heizöl stellt [33] einige Werte bereit, aus denen in Tabelle 4.26 die Streuung ermittelt wird. Die Anlagentechnik spielt bei den NO_x-Emissionen bei der Verbrennung von Erdgas eine entscheidende Rolle. [33] stellt für die gängige und die Low-NO_x-Technik für Industriefeuerungen lediglich Anhaltswerte bereit. Es liegen keine Angaben darüber vor, wie verbreitet die jeweiligen Techniken sind. Daher wird ein Bereich der NO_x-Emissionen aus dem niedrigsten Wert für die Low-NO_x-Technik (10 kg/TJ) und einem Anhaltswert für die konventionelle Technik (50 kg/TJ) bestimmt. Dieser Bereich wird wie in Abschnitt 3.2.2 erläutert behandelt, der Bereich wird also in eine 2s-Umgebung um den Mittelwert abgebildet. Für die relativen Streuparameter ergibt sich so:

$$\frac{m_x}{\bar{x}} = \frac{s_x}{\bar{x}} = 0,33, \quad n = 2$$

Für den Energieträger Steinkohle liegen ausreichend Werte aus Feuerungen vor, um daraus die Streuungen abzuschätzen. Sie wurden bereits in Tabelle 4.25 angegeben.

Für Hochofengas und Koksofengas liegen nur Anhaltswerte vor. Es wird angenommen, daß sich die Verhältnisse der Erdgasfeuerung, der diese Gase auch zugemischt werden, in Form der relativen Streuungen übertragen lassen.

Staub

Hier stehen lediglich Anhaltswerte zur Verfügung, die in der Regel auf Schätzungen beruhen. So spielen beispielsweise bei der Kohle die Staubemissionen bei Lagerung und Transport der Kohle eine dominante Rolle. Alle dazu in [33] wiedergegebenen Werte sind allerdings Schätzungen. Dementsprechend werden die Werte hier wie Schätzwerte behandelt.

Für die Verbrennung von Brenngasen gibt [33] den Bereich (0..4) kg/TJ für die Partikelemission an. Aus diesen Bereichsangaben werden gemäß Abschnitt 3.2.2 die Streuungen abgeschätzt zu:

$$m_x = s_x = 1 \text{ kg/TJ}.$$

Bereitstellung elektrischer Energie

Analog zu den Feuerungsprozessen stützt sich das Modell zur Bereitstellung elektrischer Energie auf [33], da diese Quelle die umfangreichste veröffentlichte Dokumentation zur Strombereitstellung in Europa darstellt.

Die Prozeßketten in [33] umfassen Rohstoffförderung, Aufbereitung, Transport, Bau der Anlagen, Entsorgungsprozesse sowie Energiewandlung. Die für dieses Projekt ausgewählten Emissionsfaktoren und Primärenergicaufwendungen zeigt Tabelle 4.27. Im folgenden wird die Abschätzung der Streuungen der Emissionsfaktoren diskutiert. Eine ausführliche Diskussion der Emissionsfaktoren selbst findet sich in [33]. Für die Bereitstellung elek-

Tabelle 4.27: Primärenergieeinsatz und Emissionsfaktoren des Modells zur Bereitstellung elektrischer Energie nach Angaben in [33]. Alle Werte beziehen sich auf 1 MJ elektrische Energie und schließen die Bereitstellung der Energieträger sowie die Wandlung im Kraftwerk ein. Angegeben sind Mittelwert $\langle x \rangle$, Streuungsmaß m sowie die Standardabweichung s und der Umfang der Datenbasis n .

	Steinkohle-Kraftwerk				Braunkohle-Kraftwerk				Erdgas-Kraftwerk			
	$\langle x \rangle$	m	s	n	$\langle x \rangle$	m	s	n	$\langle x \rangle$	m	s	n
Energieträger	MJ/MJ	MJ/MJ	MJ/MJ		MJ/MJ	MJ/MJ	MJ/MJ		MJ/MJ	MJ/MJ	MJ/MJ	
Steinkohle	4,55E+00	1,24E+00	1,54E+00	9	-	-	-	0	-	-	-	0
Braunkohle	-	-	-	0	3,41E+00	2,92E-01	7,16E-01	7	-	-	-	0
Erdgas	-	-	-	0	-	-	-	0	2,34E+00	1,11E-01	2,58E-01	6
Öl	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Eprim aus Uran	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Pot. En. Wasser	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Em. in Luft	kg/MJ	kg/MJ	kg/MJ		kg/MJ	kg/MJ	kg/MJ		kg/MJ	kg/MJ	kg/MJ	
CH ₄	1,89E-06	1,90E-07	6,29E-07	12	6,51E-05	2,24E-05	5,01E-05	5	4,21E-04	1,05E-04	2,28E-04	1
CO	5,72E-06	9,65E-08	2,73E-07	9	3,75E-05	1,48E-06	3,61E-06	7	7,64E-05	3,82E-05	3,82E-05	1
CO ₂	2,70E-01	2,70E-03	7,65E-03	9	3,70E-01	1,65E-02	4,05E-02	7	2,08E-01	2,77E-02	7,33E-02	8
HCl	8,18E-05	9,77E-06	2,76E-05	9	5,98E-05	2,16E-05	5,30E-05	7	2,78E-07	1,39E-07	1,39E-07	1
HF	8,72E-06	2,58E-06	7,28E-06	9	6,22E-06	1,68E-06	4,12E-06	7	2,74E-08	1,37E-08	1,37E-08	1
N ₂ O	1,72E-06	2,07E-08	5,86E-08	9	1,89E-06	7,61E-08	1,86E-07	7	1,54E-06	7,71E-07	7,71E-07	1
NH ₃	1,60E-06	3,35E-07	9,49E-07	9	1,43E-07	8,80E-08	2,16E-07	7	6,81E-08	3,41E-08	3,41E-08	1
NM VOC	2,98E-05	3,96E-06	1,12E-05	9	6,93E-06	4,83E-07	1,18E-06	7	2,08E-05	5,17E-06	1,13E-05	1
NO _x	5,32E-04	1,04E-04	2,94E-04	9	5,42E-04	1,18E-04	2,88E-04	7	4,21E-04	7,01E-05	1,86E-04	8
SO ₂	1,11E-03	3,26E-04	9,23E-04	9	1,85E-03	1,51E-03	3,70E-03	7	9,41E-05	1,21E-05	3,20E-05	8
Staub	3,69E-04	1,05E-04	2,96E-04	9	5,76E-04	8,92E-05	2,18E-04	7	5,55E-05	2,78E-05	2,78E-05	1

	Öl-Kraftwerk				Kernkraft				Wasserkraft			
	$\langle x \rangle$	m	s	n	$\langle x \rangle$	m	s	n	$\langle x \rangle$	m	s	n
Energieträger	MJ/MJ	MJ/MJ	MJ/MJ		MJ/MJ	MJ/MJ	MJ/MJ		MJ/MJ	MJ/MJ	MJ/MJ	
Steinkohle	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Braunkohle	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Erdgas	-	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	0
Öl	3,04E+00	3,21E-02	1,01E-01	11	-	-	-	0	-	-	-	0
Eprim aus Uran	-	-	-	0	3,22E+00	6,20E-03	6,20E-03	2	-	-	-	0
Pot. En. Wasser	-	-	-	0	-	-	-	0	1,23E+00	3,60E-02	3,60E-02	2
Em. in Luft	kg/MJ	kg/MJ	kg/MJ		kg/MJ	kg/MJ	kg/MJ		kg/MJ	kg/MJ	kg/MJ	
CH ₄	3,08E-04	1,38E-04	1,38E-04	3	5,71E-06	2,86E-06	2,86E-06	1	2,44E-06	1,22E-06	1,22E-06	1
CO	6,33E-05	1,07E-05	2,62E-05	6	2,64E-06	1,32E-06	1,32E-06	1	9,19E-07	4,60E-07	4,60E-07	1
CO ₂	2,60E-01	6,96E-03	2,09E-02	10	2,27E-03	1,14E-03	1,14E-03	1	1,10E-03	5,52E-04	5,52E-04	1
HCl	2,81E-06	1,76E-06	3,06E-06	3	1,46E-07	7,29E-08	7,29E-08	1	4,93E-08	2,47E-08	2,47E-08	1
HF	2,84E-07	1,42E-07	1,42E-07	1	3,03E-08	1,52E-08	1,52E-08	1	5,38E-09	2,69E-09	2,69E-09	1
N ₂ O	5,34E-06	2,21E-06	5,41E-06	6	6,66E-08	3,33E-08	3,33E-08	1	1,62E-08	8,12E-09	8,12E-09	1
NH ₃	2,15E-07	1,07E-07	1,07E-07	1	1,30E-07	6,50E-08	6,50E-08	1	5,80E-09	2,90E-09	2,90E-09	1
NM VOC	5,59E-04	2,96E-04	2,96E-04	3	3,53E-06	1,77E-06	1,77E-06	1	1,03E-06	5,16E-07	5,16E-07	1
NO _x	6,02E-04	4,43E-05	1,33E-04	10	9,01E-06	4,50E-06	4,50E-06	1	4,27E-06	2,14E-06	2,14E-06	1
SO ₂	2,42E-03	4,51E-04	1,35E-03	10	1,69E-05	8,43E-06	8,43E-06	1	3,05E-06	1,53E-06	1,53E-06	1
Staub	8,05E-05	2,93E-05	8,79E-05	10	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1

Tabelle 4.28: Thermische Wirkungsgrade von Kernkraftwerken nach [33] zur primärenergetischen Bewertung.

Kraftwerkstyp	η_{therm}
Druckwasserreaktor	0,31
Siedewasserreaktor	0,312

trischer Energie über fossile Kraftwerke gibt [33] jeweils länderspezifische Werte für die UCPTE-Staaten an. Die Abschätzung der Streuungen erfolgt generell durch gewichtete Mittelwertbildungen für den UCPTE-Raum, wie Anhang D.2 zeigt.

Primärenergie

Analog zum Vorgehen bei der primärenergetischen Bewertung bei den Feuerungen werden auch hier die verbrauchten fossilen Primärenergieträger nach [33] mit den Heizwerten aus Tabelle 4.19 bewertet. Die Primärenergieaufwände der Prozeßkette zur Stromerzeugung aus Kern- und Wasserkraft werden wie auf Seite 96 erläutert bewertet. Für die Bewertung der Wasserkraft kann dabei direkt auf Angaben von [33] zurückgegriffen werden, da die potentielle Energie des Wassers angegeben wird. Die Wirkungsgrade nach [33] sind in Tabelle 4.28 angegeben.

Methan

Unabhängig davon, welcher fossiler Energieträger verstromt wird, werden die Methanemissionen maßgeblich von den Freisetzungen beim Abbau dominiert. Daher werden die Streumaße durch Mittelwertbildung der Emissionen bei der Förderung abgeschätzt. Die relative Streuung wird dann analog zum Vorgehen bei den Feuerungsprozessen auf die Gesamtemission der Prozeßkette übertragen. Zahlenwerte finden sich im Anhang D.2.

Kohlenmonoxid

Die Bildung von Kohlenmonoxid findet ganz überwiegend im Verbrennungsprozeß statt. Für den Einsatz von Brenngasen finden sich in [33] nur sehr wenige Werte. Daher werden die CO-Emissionen als Anhaltswerte behandelt. Beim Öleinsatz hingegen lagen genügend Daten für eine Abschätzung der Streuungsmaße vor, wie Tabelle 4.29 zeigt. Die relativen Streuungen werden auf den Bilanzwert übertragen. Die Höhe der Kohlenmonoxidemissio-

Tabelle 4.29: Kohlenmonoxidemissionen für ölthermische Kraftwerke nach [33].

[kg/TJ _{in}]	$\bar{x}$	$m_x/\bar{x}$	$s_x/\bar{x}$	n	Eyre [105]	OECD [106]	DoE [107]	UBA [100]	VEÖ [94]	Kraftw. [91]
CO	11,5	0,17	0,41	6	14,2	14,4	14,7	3	14	8,6

Tabelle 4.30: Abschätzung der relativen Streuung des Salzsäureemissionsfaktors aus dem Chlorgehalt von Erdöl nach [33].

[mg/kg]	$\bar{x}$	$m_x/\bar{x}$	$s_x/\bar{x}$	n	Korte [108]	Valkovic [109]	
Chlor	18,1	0,63	1,01	3	12,5	39,3	1,81

nen sind stark anlagenspezifisch. Im Falle der Stein- und Braunkohle werden die länderspezifischen Angaben nach [33] im Anhang D.2 genutzt.

Kohlendioxid

Beim Kohlendioxid dominieren eindeutig die Kraftwerksemissionen. [33] stellt länderspezifische Wirkungsgrade, beziehungsweise im Falle der Brenngase den spezifischen Mix von Erdgas, Hochofengas und Koksofengas, bereit. Die Streuung läßt sich damit durch die Mittelung über länderspezifische Kraftwerke ermitteln. Die Ergebnisse finden sich im Anhang D.2.

Säuren, Lachgas

Die Salz- und Flußsäureemissionen stammen ebenso wie die Lachgasemissionen überwiegend aus der Feuerung im Kraftwerk. Für Braun- und Steinkohle liegt daher eine Mittelung über die Werte der einzelnen UCPT-Staaten nahe. Beim Energieträger Öl wird die Streuung der Salzsäureemissionen aus dem Chlorgehalt des Brennstoffs nach Tabelle 4.30 grob abgeschätzt. Für die Brenngase und die Flußsäureemission beim Öl stellt [33] nur Anhaltswerte bereit, entsprechend wird der Emissionsfaktor auch als Anhaltswert in der Bilanz behandelt. Für die Lachgasemissionen von Kraftwerken gibt [33] einige Werke an, die zur Abschätzung der relativen Streuungen in Tabelle 4.31 herangezogen werden.

Ammoniak

Die Emission von Ammoniak wird in [33] nicht ausführlich diskutiert. Angesichts der starken Schwankungen der länderspezifischen Werte bei der Kohleverstromung (siehe Anhang D.2) wird angenommen, daß sich die Streuungen daraus abschätzen lassen. Bei den Pro-

Tabelle 4.31: Lachgasemissionen verschiedener Ölkraftwerke nach [33]. Die Daten werden zur Abschätzung der relativen Streuung der Lachgasemissionen genutzt.

[kg/TJ _{in}]	$\bar{x}$	$m_x/\bar{x}$	$s_x/\bar{x}$	n	Hackl [110]	Yokoyama ¹⁾ [111]	Vitovec [112]	Hayhurst [113]
N ₂ O	2,4	0,41	1,01	6	4,5	0,18 [0,06 ; 0,47]	4,6	4,7

¹⁾ Minimal-, Maximal- und Mittelwert aus Messungen an 23 Kraftwerken.

zeßketten für Öl und Brenngase gibt [33] nur Anhaltspunkte an, entsprechend werden sie auch bei der Bilanzierung mit der Schätzstreuung verarbeitet.

NMVOC

Bei der Kohleverstromung dominieren die Transportprozesse als Quelle der nicht-methanen flüchtigen Kohlenwasserstoffe. Da in den länderspezifischen Angaben nach [33] die unterschiedlichen Importanteile und Transportdistanzen berücksichtigt werden, lassen sich die Streuungsmaße durch Mittelung über diese Angaben abschätzen, wie im Anhang D durchgeführt.

Bei Öl und Gas wird die überwiegende Menge an NMVOC bei Förderung und Ferntransport freigesetzt. Die Streuungen werden daher völlig analog zu denen der Öl- und Gasfeuerungen bestimmt, wie in Abschnitt 4.2.5 erläutert. Die Resultate finden sich in Tabelle 4.20 und Tabelle 4.21.

Stick- und Schwefeloxide

Aus dem Verbrennungsprozeß im Kraftwerk und den Transporten resultiert der größte Anteil der Stick- und Schwefeloxidemissionen. Die Schwefeloxidemissionen des Kraftwerks hängen dabei vom Schwefelgehalt des eingesetzten Brennstoffes sowie vom Ausmaß der Entschwefelungsmaßnahmen ab. Alle maßgeblichen Unterschiede sind in den länderspezifischen Emissionsfaktoren nach [33] erfaßt. Die Abschätzung der Streuungsmaße geschieht daher durch gewichtete Mittelung über diese Angaben in Anhang D.

Staub

Bei der Kohleverstromung hängen die Staubemissionen maßgeblich vom Anteil des Untertagebaus beim Abbau, den Transportdistanzen und dem Ausmaß der Rückhaltung bei der Feuerung ab. Dieser Einfluß wird gut in den spezifischen Werten für die UCPTE-Staaten nach [33] wiedergespiegelt. Die Streuungsmaße lassen sich daher nach dem Anhang D bestimmen.

Bei den ölthermischen Kraftwerken spielen die Brennstoffzusammensetzung, die Brennerkonstruktion, Luftüberschuß und Filtermaßnahmen entscheidende Rollen. [33] rechnet mit Emissionsfaktoren, die diese Faktoren für die jeweiligen Länder abschätzend berücksichtigen. Die Streuungen können daher per Mittelung über die Emissionsfaktoren der UCPTE-Staaten in Anhang D ermittelt werden. Die Staubemission bei der Bereitstellung elektrischer Energie aus Brenngasen ist vergleichsweise gering. [33] liefert nur Anhaltswerte. Die Abschätzung mittels des Schätzfehlers erscheint daher angemessen.

Wasserkraft und Kernenergie

Die Bereitstellung über die Kernenergie oder Wasserkraft führt zu vergleichsweise deutlich niedrigeren Werten bei den betrachteten Emissionen wie Tabelle 4.27 zu entnehmen ist. Der Beitrag sowohl zu den Emissionen wie auch zu deren Streuung in der Gesamtbilanz ist daher klein. Die Emissionen stammen nur zu einem sehr geringen Teil aus dem Energiewandlungsprozeß selber. Daten aus den vorgelagerten Ketten sind im allgemeinen recht unsicher. Daher erscheint hier der Fehler für Schätzwerte für die Emissionsfakto-

ren angemessen. Aufgrund des geringen Einflusses auf die Streuung in der Gesamtbilanz ist die Genauigkeit ausreichend. Analoge Überlegungen gelten für den Bedarf an fossiler Primärenergie. Für diese Größen wird daher ein gewichteter Mittelwert bestimmt und dieser jeweils wie ein Schätzwert behandelt.

Der Primärenergieeinsatz wird maßgeblich durch den Kraftwerksnutzungsgrad bestimmt. Der Nutzungsgrad wird nach [114] für die Wasserkraft als das Verhältnis zwischen Nettoenergiebereitstellung und potentieller Energie des Wassers definiert. Bei der Kernenergie wird der thermische Nutzungsgrad des Dampfprozesses innerhalb der Kraftwerke zugrunde gelegt [114]. Die Streuung des Primärenergiebedarfs wird daher durch die Streuung der Kraftwerksnutzungsgrade bestimmt. Die Nutzungsgrade schwanken aus naheliegenden Gründen am stärksten für verschiedene Kraftwerkstypen. Die Abschätzung der Streuungen erfolgt daher durch gewichtete Mittelung über die jeweils typischen Kraftwerkstypen, wie im Anhang D durchgeführt. Die Ergebnisse sind Tabelle 4.27 zu entnehmen.

Energiebereitstellung Primäraluminium

Bei der primärenergetischen Bewertung der Primäraluminiumproduktion kommt dem Bereitstellungsmodell für die in der Schmelzflußelektrolyse benötigte Energie eine Schlüsselrolle zu. Je nach Nutzungsgrad des zugrundegelegten Kraftwerkmixes kann der kumulierte Energieaufwand in einem Bereich von ca. 60 bis 260 GJ/t schwanken [114].

Diese große Spanne liegt im hohen, sehr gleichmäßigen und damit grundlastfreundlichen Bedarf an elektrischer Energie einer Primäraluminiumhütte begründet. Dies führt dazu, daß viele Hütten den Bedarf aus eigenen Kraftwerken oder aus einem vertraglich gebundenen Kraftwerk eines Energieversorgungsunternehmens decken. Dem in der Schmelzflußelektrolyse eingesetzten Strom liegt somit ein eigener Energieträgermix zugrunde. Für die europäischen Hütten wurde dieser Mix von der European Aluminium Association (EAA) für 1993 in [11] veröffentlicht.

Wie Abbildung 4.6 zeigt, beinhaltet der EAA-Mix einen wesentlich höheren Anteil an emissionsarmen Wasserkraftwerken. Je nachdem, ob man nun die primärenergetische Be-

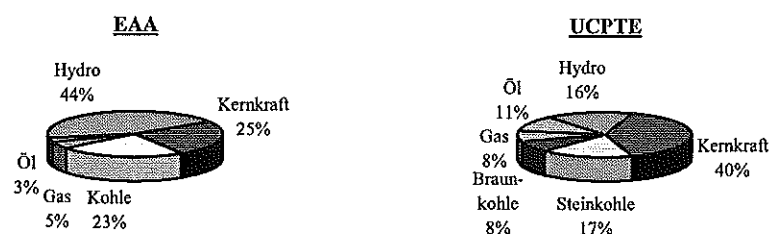


Abbildung 4.6: Energieträgeranteile an der Bereitstellung elektrischer Energie nach UCPTE und speziell für Primäraluminiumhütten nach EAA.

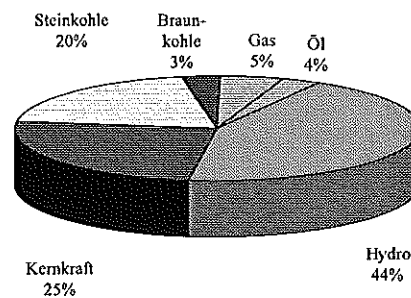


Abbildung 4.7: Um den Braunkohleanteil korrigierter EAA-Mix der Strombereitstellung für Aluminiumhütten in Europa.

wertung mit einem Bereitstellungsnutzungsgrad⁹ entsprechend fossiler Kraftwerke, also etwa $g \approx 0,3$, oder mit der potentiellen Energie eines Wasserkraftwerkes, entsprechend $g \approx 0,85$, vornimmt, ergibt sich das obere beziehungsweise untere Ende obiger Bandbreite für den kumulierten Energieaufwand [114].

Es liegt auf der Hand, daß der zugrundeliegende Energieträgermix, insbesondere der Wasserkraft- und Kernenergieanteil, maßgeblichen Einfluß auf Quantität und Qualität der Emissionen hat.

Betrachtet man den in Abbildung 4.6 angegebenen EAA-Mix näher, so fällt auf, daß nicht zwischen Braunkohle und Steinkohle unterschieden wird. Aus [115] läßt sich entnehmen, daß in Europa keine Hütten mit eigenem Braunkohlekraftwerk existieren. Allerdings gibt es Hütten in Deutschland, Frankreich, Ungarn und der Niederlande, die Strom aus dem öffentlichen Netz beziehen. Für Frankreich und die Niederlande ist der Anteil der Braunkohle als Energieträger zur Strombereitstellung vernachlässigbar klein ($\leq 3,1\%$), wie sich [11] entnehmen läßt. Der Umfang der Primäraluminiumproduktion Ungarns ist mit etwa $1/20$ gegenüber dem Deutschlands [116] ebenfalls vernachlässigbar. In Deutschland wird nach [115] 87% des Bedarfs an elektrischer Energie der Hütten aus dem öffentlichen Netz gedeckt. Nach [11] hat die Braunkohle in Deutschland einen Anteil von $18,8\%$.¹⁰ Der Anteil der deutschen Primäraluminiumproduktion an der europäischen Gesamtproduktion betrug nach [116] 1993 ca. 17%. Damit ergibt sich für die europäische Primäraluminiumproduktion ein Anteil der Braunkohle als Energieträger zur Strombereitstellung von

$$0,17 \cdot 0,87 \cdot 0,19 \approx 0,03.$$

Diese drei Prozentpunkte werden vom Kohle-Anteil des EAA-Mixes subtrahiert, und es ergibt sich ein um den Braunkohle-Anteil korrigierter Mix, wie in Abbildung 4.7 dargestellt.

Nach [11] werden 40% des verbrauchten Primäraluminiums in Europa importiert. Dieser Mix allein reicht daher offensichtlich für eine angemessene Beschreibung nicht aus. Das Importaluminium stammt laut [11] ausschließlich aus Kanada, was allerdings im Widerspruch zu den Importstatistiken für Deutschland steht. Gemäß der Angaben von [116]

⁹Nutzungsgrad, der Energiewandlung im Kraftwerk und Brennstoffbereitstellung berücksichtigt.

¹⁰Wird ein spezieller Grundlastmix unterstellt, erhöht sich der Anteil. Bei der folgenden Abschätzung des Importmixes ist der Grundlastmix unbekannt. Aus Konsistenzgründen muß daher auf diesen Ansatz verzichtet werden.

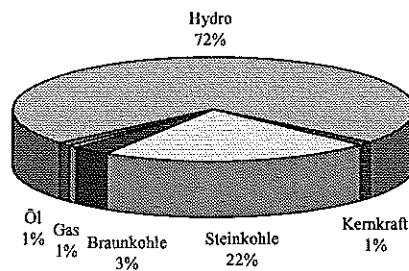


Abbildung 4.8: Kapazitätsgewichteter Import-Energieträger-Mix zur Strombereitstellung.

stammten 1993 nur knapp 10% der nicht westeuropäischen Importe Deutschlands aus Kanada, wohingegen allein 15% aus Rußland und weitere 10% aus Ghana kamen. Vergleichbare statistische Daten für den europäischen Raum liegen leider nicht vor. In [117] finden sich, unter Berufung auf Statistiken des International Primary Aluminium Institut (IPAI), Angaben zur Erzeugung und Bedarf an Primäraluminium in Westeuropa für die Jahre 1994/1995. Berechnet man aus diesen Angaben den Anteil der europäischen Eigenerzeugung (siehe Tabelle 4.32), so findet man die Angabe von 40% Importanteil in [11] bestätigt.

Tabelle 4.32: Aluminiumproduktion und -verbrauch in Westeuropa nach [117].

Jahr	Produktion	Verbrauch	Bedarfsdeckung
1994	3,05 Mio t	5,15 Mio t	59%
1995	3,13 Mio t	5,25 Mio t	60%

Als Hauptherkunftsländer nennt [117] allerdings unter Berufung auf IPAI-Statistiken die Regionen GUS, Südamerika, Afrika und Nordamerika. Für diese Regionen wurde mit Hilfe von [115] ein nach den Produktionskapazitäten der Hütten gewichteter Mix von Energieträgern zur Strombereitstellung ermittelt (Abbildung 4.8).

Dieser Mix wurde gewichtet mit dem westeuropäischen Mix (Abbildung 4.7) gemittelt. Als Gewichtung ist dabei

60% westeuropäischer Mix,
40% Importmix

gemäß [11] und [117] eingegangen. Das Ergebnis zeigt Abbildung 4.9.

Es sei angemerkt, daß dieses Vorgehen in Frage gestellt werden kann. Würde der Strom aus dem emissionsarmen Mix nach Abbildung 4.9 in das örtliche Stromnetz eingespeist werden, müßte der jeweilige länderspezifische Strommix der Bilanzierung zugrunde gelegt werden. Außerhalb Europas wird Aluminium oftmals bei weit entlegenen Kraftwerken

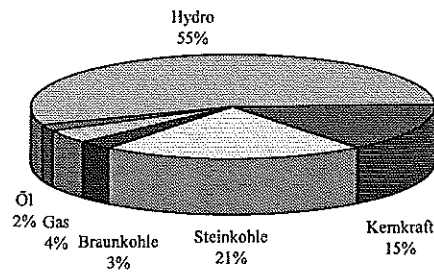


Abbildung 4.9: Energieträgeranteile zur Strombereitstellung für Schmelzflußelektrolyse bei der Primäraluminiumherstellung in Westeuropa unter Berücksichtigung des Importanteils.

oder in Ländern erzeugt mit einem erheblichen Anteil der Wasserkraft an der Strombereitstellung. Damit ist die Einspeisung entweder nicht realistisch oder beeinflusst den zugrundezulegenden Energieträgermix der Strombereitstellung nur wenig. Für den innerhalb Europas erzeugten Anteil des Primäraluminiums ist eine Einspeisung etwa in das UCPT-Netz denkbar. Unter dieser Annahme wäre die Zuordnung eines speziellen Energieträger-Mixes zur Aluminiumproduktion keine adäquate Beschreibung. In Kapitel 5 wird daher alternativ die Schmelzflußelektrolyse mit Strom aus dem UCPT-Netz in der Bilanz berücksichtigt.

4.2.6 Transporte

Die Transporte spielen in der Bilanz eine untergeordnete Rolle. So haben nach [31] die Transporte einen vernachlässigbaren Einfluß auf die Gesamtbilanz zur Herstellung von Stahlprodukten. Den größten Einfluß dabei hat der Seetransport der Rohstoffe, da in beiden Prozeßketten große Mengen an Erz, Bauxit, Tonerde und Kohle über große Distanzen verschifft werden. Der Beitrag durch Nutzung von Binnenschiff, Lkw oder Bahn ist vergleichsweise sehr gering. Die Transportentfernungen und Auslastungen der Nahtransporte hängen sehr stark vom Standort ab. Da repräsentative Zahlen im allgemeinen nicht bekannt sind, wird hier in der Regel mit Anhaltswerten gearbeitet, wie beispielsweise in [11]. Aufgrund dieser Überlegungen wurden für die Abbildung von Binnenschiff-, Lkw- und Bahntransporten nur Einzelwerte nach [118] verwendet, da die Behandlung als Schätzwert offensichtlich angemessen ist. Die verwendeten Werte pro Kilogramm und Kilometer für die verschiedenen Transportmittel zeigen die Tabellen 4.33 und 4.34. Dem Transportmittel Bahn liegt ein Mix aus dem Einsatz von Dieselloks zu 20% und dem von Elektroloks zu 80% zugrunde. Diese Aufteilung wird in [118] für deutsche Verhältnisse angegeben, es wird davon ausgegangen, daß sich dies näherungsweise auf Europa übertragen läßt. Transportentfernungen und Auslastungsgrade bei den Hochseetransporten hingegen sind kaum standortabhängig. Hier wird ein Fehler von 10% für die Standardabweichung und die Standardabweichung des Mittelwertes geschätzt. Damit werden auch die Streuungen

Tabelle 4.33: Energiebedarf und Emissionen verschiedener Transportmittel nach [118].

Energieträger	Binnenschiff			LKW Fern			LKW nah			Bahn		
	<x>	m,s	n	<x>	m,s	n	<x>	m,s	n	<x>	m,s	n
	MJ/(kg*km)	MJ/(kg*km)		MJ/(kg*km)	MJ/(kg*km)		MJ/(kg*km)	MJ/(kg*km)		MJ/(kg*km)	MJ/(kg*km)	
Strom Bahn ¹⁾	-	-	0	-	-	0	-	-	0	6,00E-05	3,00E-05	1
Öl S	-	-	0	-	-	0	-	-	0	-	-	0
Diesel	5,00E-04	2,50E-04	1	2,13E-03	1,07E-03	1	3,60E-03	1,80E-03	1	1,20E-04	6,00E-05	1
thermisch	-	-	0	2,13E-03	1,07E-03	1	3,60E-03	1,80E-03	1	1,20E-04	6,00E-05	1
Em. in Luft	kg/(kg*km)	kg/(kg*km)		kg/(kg*km)	kg/(kg*km)		kg/(kg*km)	kg/(kg*km)		kg/(kg*km)	kg/(kg*km)	
CH ₄	1,00E-08	5,00E-09	1	1,00E-08	5,00E-09	1	4,00E-08	2,00E-08	1	2,00E-09	1,00E-09	1
CO	1,00E-07	5,00E-08	1	1,23E-07	6,13E-08	1	5,00E-07	2,50E-07	1	3,00E-08	1,50E-08	1
CO ₂	3,70E-05	1,85E-05	1	1,58E-04	7,89E-05	1	2,67E-04	1,33E-04	1	8,89E-06	4,44E-06	1
HCl	-	-	0	-	-	0	-	-	0	-	-	0
HF	-	-	0	-	-	0	-	-	0	-	-	0
N ₂ O	4,00E-11	2,00E-11	1	5,00E-11	2,50E-11	1	1,00E-10	5,00E-11	1	1,00E-11	5,00E-12	1
NH ₃	-	-	0	-	-	0	-	-	0	-	-	0
NM VOC	4,00E-08	2,00E-08	1	8,75E-08	4,38E-08	1	4,00E-07	2,00E-07	1	2,80E-08	1,40E-08	1
NO _x	4,00E-07	2,00E-07	1	8,03E-07	4,01E-07	1	1,50E-06	7,50E-07	1	1,00E-07	5,00E-08	1
SO ₂	3,73E-08	1,87E-08	1	1,59E-07	7,95E-08	1	2,69E-07	1,34E-07	1	4,48E-09	4,48E-09	1
Staub	1,00E-08	5,00E-09	1	5,75E-08	2,88E-08	1	1,00E-07	5,00E-08	1	7,00E-09	3,50E-09	1

¹⁾ Energieträgermix der Eigenstromerzeugung europäischer Bahnen nicht bekannt, daher mit UCPTB verknüpft.

pro Kilogramm und Kilometer relevant. Die Abschätzung erfolgt hier aus dem Vergleich zwischen Diesel- und Dampfturbinenantrieb nach [33]. Die durchschnittliche Größe eines Frachters mit Dieselmotor liegt bei etwa 50 000 dwt, wohingegen Schiffe mit Dampfturbinenantrieb im Mittel bei 145 000 dwt liegen [33]. Nach [46] lagen 1990 bereits 41% der im Überseehandel eingesetzten Erzfrachter oberhalb von 150 000 dwt. Es wird daher ein Anteil an Schiffen mit Dampfturbinen von 41% zugrundegelegt. Für den Energiebedarf wird nicht nur ein Mittelwert nach [33] zugrundegelegt, sondern auch die Angabe eines Intervalls in der gleichen Quelle.

Für die CO₂- und SO₂-Emissionen werden mit Hilfe der in [33] angegebenen Emissionsfaktoren ebenfalls Intervalle berechnet. Die verwendeten Daten sind in Tabelle 4.34 dokumentiert.

Tabelle 4.34: Energiebedarf und Emissionen bei Hochseetransporten nach Frischknecht [33].

Energieträger	Hochseeschiff			Turbine Diesel		
	<x>	m,s	n	Anteil	0,41	0,59
	MJ/(kg*km)	MJ/(kg*km)		MJ/(kg*km)	MJ/(kg*km)	MJ/(kg*km)
Öl S	8,56E-05	2,33E-05	3	8,56E-05	[3,89E-05; 1,17E-04]	
thermisch	8,92E-05	1,69E-05	4	8,56E-05	[3,89E-05; 1,17E-04]	
Em. in Luft	kg/(kg*km)	kg/(kg*km)		kg/(kg*km)	kg/(kg*km)	kg/(kg*km)
CH ₄	1,04E-09	6,56E-10	2	-	2,58E-10	1,59E-09
CO	7,49E-09	5,41E-09	2	-	1,00E-09	1,20E-08
CO ₂	6,77E-06	1,85E-06	3	6,77E-06	[3,08E-06; 9,23E-06]	
HCl	-	-	0	-	-	-
HF	-	-	0	-	-	-
N ₂ O	3,00E-11	1,50E-11	1	-	-	-
NH ₃	-	-	0	-	-	-
NM VOC	1,38E-09	8,69E-10	2	-	3,42E-10	2,11E-09
NO _x	6,07E-08	4,48E-08	2	-	7,00E-09	9,80E-08
SO ₂	1,59E-07	4,34E-08	3	1,59E-07	[7,23E-08; 2,17E-07]	
Staub	5,05E-09	5,41E-10	2	-	4,40E-09	5,50E-09

Im folgenden werden die zugrunde gelegten Transportdistanzen diskutiert. In [11] werden Transportdistanzen für die Eisenerzimporte aus den Ländern Brasilien, Australien und Kanada angegeben. Dabei werden unabhängig von den Herkunftsländern für Bahn und Fernverkehrs-Lkw folgende Distanzen aufgeführt:

Bahn	1000 km,
Lkw	200 km.

Die Distanzen für den Hochseetransport variieren mit dem Herkunftsland. Aus [46] läßt sich die Verteilung der europäischen Erzimporte abschätzen, damit ergibt sich für den Hochseetransport:

Australien	21 000 km	ca. 25%,
Brasilien	10 000 km	ca. 50%,
Kanada	8 500 km	ca. 25%.

Ein weiterer wichtiger Rohstofftransport für die Roheisenerzeugung besteht im Kohletransport zu den Hüttenkokereien. Sowohl in [31] als auch in [11] werden als Transportweg von Kohlezeche zur Kokerei 30 km Bahntransport angegeben. Dies ist für westdeutsche Verhältnisse durchaus angemessen, da der Hüttenvertrag von 1969 die westdeutsche Stahlindustrie zum ausschließlichen Einsatz deutscher Kohle bzw. daraus produzierten Koks verpflichtet [49, 77].

Diese spezielle Situation ist jedoch nicht auf andere europäische Stahlproduzenten übertragbar. Nach [119] importierte die EU 1996 138 Millionen Tonnen Kohle. Bei 30% der Importe handelte es sich um Kokskohle, die zur Herstellung von Hochofen- und Industriekoks verwendet wird. Da Koks ganz überwiegend in der eisenschaffenden Industrie zum Einsatz kommt, ist zu erwarten, daß ein großer Teil der importierten Kokskohle zu Hüttenkoks verarbeitet wird. Nach [119] ist die Steinkohleneinfuhr innerhalb der EU mit 2,5 Millionen Tonnen (1996) gegenüber den Einfuhren aus Drittländern mit 138 Millionen Tonnen vernachlässigbar. Innerhalb der EU fördern nur die Länder Deutschland, Großbritannien, Frankreich und Spanien selbst Steinkohle [119]. Im Falle von Frankreich liegt die gesamte Steinkohleförderung in der Größenordnung der importierten Kokskohle. Daher wird für dieses Land angenommen, daß die verwendete Kokskohle zur Hälfte importiert wird und zur Hälfte aus heimischen Beständen stammt. Für Deutschland, Großbritannien und Spanien wird angenommen, daß nur Kokskohle aus heimischen Beständen in den Kokereien eingesetzt wird. Für die anderen roheisenproduzierenden Staaten kann in guter Näherung davon ausgegangen werden, daß die gesamte benötigte Kokskohle importiert wird. Gewichtet mit der Produktion von Stahlroheisen nach [120] ergibt sich für Europa damit ein Anteil von etwa 55% heimischer und 45% aus Drittländern importierter Kokskohle.

Für Kokskohle aus heimischen Beständen wird, in Anlehnung an deutsche Verhältnisse, ein Transportweg von 50 km Bahn angenommen.

Nach [119] stammt die Kokskohle auf dem Weltmarkt überwiegend aus Australien, Kanada und den USA. Die Steinkohleexporte von USA und Kanada nach Europa verhalten

sich zu denen aus Australien etwa wie 2,5 zu 1. In Anlehnung an das Transportmodell für Eisenerze [11] ergibt sich damit für Importkokskohle:

Bahn	1000 km,	
Lkw	200 km,	
Hochseeschiff		
Australien	21 000 km	30%,
Kanada/USA	8 500 km	70%.

Für die Transporte der Halbzeuge zum Preßwerk und von Karosserieteilen zum Rohbau liegen keine Daten vor. Um diesen Transportaufwand annähernd zu berücksichtigen, werden folgende Transportentfernungen für die Halbzeuge angenommen:

Bahn	250 km,
Lkw	250 km.

Alle weiteren berücksichtigten Transporte sind ohne weitere Aufarbeitung Quellen entnommen. Sie sind in Tabelle 4.35 zusammengefaßt. Transporte, die mit der Energiebereitstellung verknüpft sind, sind im Energiebereitstellungsmodell mit erfaßt, wie in Abschnitt 4.2.5 erläutert wird.

Tabelle 4.35: Gewichtete Transportdistanzen, die der Bilanz zugrundegelegt werden.

Transportgut	Schiff		Bahn	Lkw		Quelle
	Hochsee	Binnen		fern	nah	
Eisenerz	12375		1000	200		s. Text
Kokskohle	5430	15	465	90		s. Text
Bauxit	7917					[11]
Natronlauge		300 ¹⁾		200 ¹⁾		[11]
Kalkstein, Kalk		500				[11]
Tonerde	4587		68			[11]
Primäraluminium	4650	300	100			[11]
Aluminiumfluorid			150 ²⁾	150 ²⁾		[11]
Petrolkoks	1000					[11]
Pech		150 ³⁾		100 ³⁾		[11]
Halbzeug			250	250		s. Text
Altfahrzeug				100	20	[39]
Shredderschrott				100 ⁴⁾	20 ⁴⁾	[33]

¹⁾Angabe der Quelle: 500 km Binnenschiff/Lkw, Aufteilung: eigene Schätzung.
²⁾Angabe der Quelle: 300 km Bahn/Lkw, Aufteilung: eigene Schätzung.
³⁾Angabe der Quelle: 250 km Binnenschiff/Lkw, Aufteilung: eigene Schätzung.
⁴⁾Angabe für Stahlschrott auf Aluminium übertragen.

Kapitel 5

Auswertung

In diesem Kapitel werden anhand der Fallstudie die Möglichkeiten der statistischen Fehlerabschätzung zur Erfassung von Fehlerquellen, wie sie in der Praxis der Bilanzierung anfallen, aufgezeigt. Die Interpretation der ermittelten Standardabweichungen als Maß für die Signifikanz von beobachteten Unterschieden in den Sachbilanzkategorien wird diskutiert. Im Anschluß daran werden in Abschnitt 5.1 zunächst die Ergebnisse für Herstellung und Entsorgung vorgestellt, da die Nutzungsphase in dieser Fallstudie eine für Sachbilanzen untypische Struktur aufweist. Um den Vergleich über den gesamten Lebensweg ziehen zu können, wird in Abschnitt 5.2 die Nutzungsphase einbezogen. Abschließend wird die Bedeutung der Kovarianzen in der Bilanzierungspraxis anhand ausgewählter Prozesse aufgezeigt.

In diesem Kapitel wird nicht die gesamte Sachbilanz präsentiert, sondern ausgewählte Resultate werden graphisch verdeutlicht und diskutiert. Die Sachbilanz von Herstellung und Entsorgung findet sich vollständig tabelliert in Anhang E, die der Nutzungsphase in Abschnitt 4.2.3.

Nachdem im Abschnitt 3.2 die grundsätzliche Eignung der statistischen Fehlerabschätzung in Sachbilanzen diskutiert wurde, steht der Nachweis der Praxistauglichkeit anhand der Fallstudie noch aus. Insbesondere stellt sich die Frage, wie sich die Standardabweichungen als Maß für die Aussagekraft der einzelnen Sachbilanzwerte interpretieren lassen.

Wie in Abschnitt 3.1 erläutert, liegen bei einer Normalverteilung ca. 95% der Meßwerte innerhalb einer 2σ -Umgebung um den Mittelwert μ , genauer liegen sie in einer $1,96\sigma$ -Umgebung. Aus den empirischen Größen läßt sich ein solches Vertrauensintervall unter Einsatz der Student-Verteilung bestimmen. Nach Tabelle 3.1 liegt für einen Freiheitsgrad von zehn (entsprechend elf Einzelwerten) die Breite der Umgebung mit einem Vertrauensniveau von 95% bei $2,2s$ für die Einzeldaten und $2,2m$ für die Mittelwerte. Mit zunehmender Anzahl von Einzelwerten strebt der Faktor gegen 1,96. In guter Näherung gibt daher eine $2s$ -Umgebung mit einer Wahrscheinlichkeit von 95% den Bereich an, in dem der Wert einer Einzelmessung liegen wird. Analog dazu läßt sich eine $2m$ -Umgebung als der Bereich interpretieren, in dem der wahre Mittelwert mit einer Wahrscheinlichkeit von ca. 95% zu finden ist.

Im folgenden werden zwei Mittelwerte $\bar{x} > 0$, $\bar{y} > 0$ betrachtet mit den Standardabweichungen m_x, s_x, m_y, s_y , die der Bedingung

$$\bar{x} > \bar{y} \quad (5.1)$$

genügen und deren $2s$ -Umgebungen nicht überlappen:

$$\bar{x} - 2s_x \geq \bar{y} + 2s_y.$$

Damit Einzelwerte x_i, y_i auftreten können, die in Widerspruch zur Relation der Mittelwerte in Gleichung 5.1 die Ungleichung

$$y_i > x_i$$

erfüllen, muß mindestens einer der beiden Werte außerhalb der $2s$ -Umgebung liegen. Die Wahrscheinlichkeit beträgt für jeden Wert etwa 5%. Da sich x_i beziehungsweise y_i einseitig außerhalb des $2s$ -Bereichs gemäß

$$\begin{aligned} x_i &< \bar{x} - 2s_x \\ \vee \quad y_i &> \bar{y} + 2s_y \end{aligned}$$

befinden muß, sinkt die Wahrscheinlichkeit auf jeweils etwa 2,5%, da die Normalverteilung symmetrisch ist. Die Gesamtwahrscheinlichkeit für das Auftreten eines solchen Wertepaares x_i, y_i ist damit geringer als 2,5%. Entsprechend hoch ist die Wahrscheinlichkeit, daß ein Unterschied gemäß Gleichung 5.1 tatsächlich besteht und nicht nur von der Stichprobe vorgetäuscht wird. Überlappen die $2s$ -Umgebungen nicht, wird von einer *2s-Signifikanz* der Gleichung 5.1 gesprochen. Analog beträgt die Wahrscheinlichkeit, daß zwei Mittelwerte anderer Stichproben $\bar{x}', \bar{y}'$ die Bedingung

$$\bar{x}' < \bar{y}'$$

erfüllen, weniger als 2,5%, wenn sich die $2m$ -Umgebungen der Mittelwerte nicht überlagern und es liegt eine $2m$ -Signifikanz¹ vor. Überschneiden sich die $3s$ - beziehungsweise $3m$ -Umgebungen nicht, so sinkt die Widerspruchswahrscheinlichkeit auf unter 0,5%, und es liegt eine $3s$ - beziehungsweise $3m$ -Signifikanz vor.

Die bisherigen Überlegungen gingen davon aus, daß die Einzelwerte einer Normalverteilung unterliegen. Da die Verteilungen der prozeßspezifischen Daten in einer Prozeßkettenanalyse im allgemeinen nicht bekannt sind, lassen sich die entsprechenden Vertrauensintervalle nicht exakt angeben. Es darf aber erwartet werden, daß die Verteilungen der Sachbilanzergebnisse sich einer Normalverteilung annähern. Zum einen liefert die Normalverteilung häufig eine gute Beschreibung für die in der Praxis beobachteten Verteilungen [24, 26, 28], und sie dürfte daher auch häufig bei den prozeßspezifischen Daten anzutreffen sein. Zum anderen strebt nach dem in Kapitel 3.1 diskutierten Grenzwertsatz der Statistik

¹Häufig wird von einer 2σ -Signifikanz gesprochen. Die genaue Bedeutung ist in diesem Fall dem Kontext zu entnehmen.

die Verteilung der Summen über die Einzelprozesse unabhängig von den Ausgangsverteilungen gegen eine Normalverteilung [26].

Wie bereits erwähnt sind die Verteilungen für die Prozeßdaten im allgemeinen nicht bekannt. Eine wichtige Größe der Fallstudie, der elektrische Energiebedarf der Schmelzflußelektrolyse zur Primäraluminiumherstellung, bildet eine Ausnahme. Hier kann die Verteilung exemplarisch bestimmt und analysiert werden. Aus [115] war es möglich, die Produktionskapazitäten der Aluminiumhütten und deren Bedarf an elektrischer Energie für gut 70% der Weltkapazität für das Bezugsjahr 1992 zu bestimmen. Mit dem plausiblen Ansatz, die Kapazität einer Hütte sei proportional zur Wahrscheinlichkeit, daß ein Kontingent Primäraluminium auf dem Weltmarkt aus selbiger Hütte stammt, läßt sich unmittelbar die empirische Verteilung des elektrischen Energiebedarfs gewinnen. Das Resultat findet sich mit den Standardabweichungen s und m in Abbildung 5.1.

Legt man diese gut validierten Ergebnisse als „wahre Größen“ zugrunde, so können sie als Testgrößen dienen. Es läßt sich nun prüfen, inwieweit sich diese „wahren“ Werte aus den üblicherweise zur Verfügung stehenden Stichproben reproduzieren lassen.

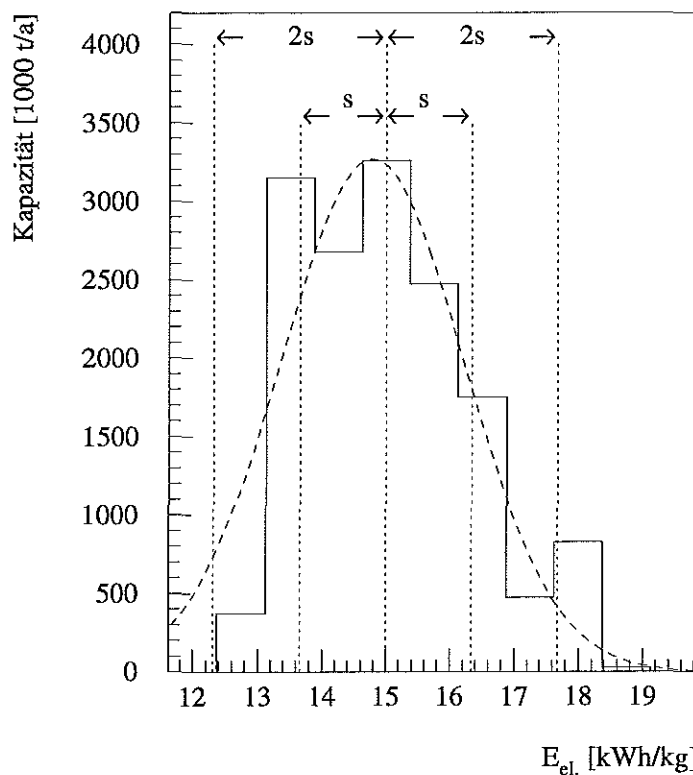


Abbildung 5.1: Produktionskapazitäten über dem Bedarf an elektrischer Energie als Verteilungsfunktion des elektrischen Energiebedarfs von Primäraluminiumhütten. Der gestrichelte Graph deutet zum Vergleich eine Normalverteilung an. Die Daten wurden [115] entnommen.

Tabelle 5.1: Bedarf an elektrischer Energie zur Primäraluminiumgewinnung aus Tonerde. Vergleich von Mittelwert $\overline{E}_{el}$ und Standardabweichungen m , s nach [115] und Stichproben aus unabhängigen Quellen. Die im linken Tabellenteil ausgewerteten Stichproben sind den Einzelwerten E_{el} des rechten Teils entnommen.

	$\overline{E}_{el}$ kWh	s kWh	m kWh	n
„wahrer Wert“ [115]	15,00	1,34	0,13	113
Stichprobe aus Nr.				
1 - 16	14,99	1,26	0,33	16
1 - 3	15,67	1,21	0,93	3
1, 4, 5	14,21	0,75	0,43	3

Nr.	Quelle	E_{el} kWh
1	[10]	15
2,3	[61]	[13; 19]
4	[63]	14,13
5	[75]	13,5
6	[123]	16,8
7	[124]	14
8		16
9	[125]	13
10		16
11	[62]	16,8
12	[126]	14,73
13		14,33
14		14,51
15		14,45
16		14,16

Als Stichprobe wurden 16 Werte zum Bedarf an elektrischer Energie der Schmelzflußelektrolyse aus der Literatur in der üblichen Weise unabhängig von den Angaben in [115] erhoben. Sie sind in der rechten Hälfte von Tabelle 5.1 dokumentiert. Es zeigt sich, daß aus diesen 16 Werten Mittelwert und Standardabweichung des „wahren Wertes“ (linke Hälfte von Tabelle 5.1) in guter Näherung abgeschätzt werden (linke Hälfte von Tabelle 5.1, Stichprobe aus Nr. 1-16). Um die Abhängigkeit von der Auswahl der Stichprobe zu prüfen, wurde sie verkleinert. Zunächst wurde nur ein konservatives Intervall nach [61] und ein häufig in literaturbasierten Sachbilanzen verwendeter Wert nach [10] verwendet (Stichprobe aus Nr. 1-3). Selbst diese Abschätzung aus nur drei Werten liefert noch ein brauchbares Ergebnis. Damit findet die vorgeschlagene Methode zur Berücksichtigung von Intervallen Bestätigung.

Trifft man jedoch eine für den Weltmarkt nicht repräsentative Auswahl von Werten moderner Anlagen (Stichprobe aus Nr. 1,4,5), so wird die Standardabweichung deutlich unterschätzt, wie Tabelle 5.1 zu entnehmen ist. Eine brauchbare Abschätzung der Standardabweichung ist demzufolge aus wenigen Werten möglich, wenn die Auswahl den auftretenden Wertebereich abdeckt. Die vorgeschlagene Methode ist also trotz geringer Statistik anwendbar, wenn hinreichende Repräsentanz der Werte gegeben ist. Für die wichtigen

Größen in einer Prozeßkette verfügt der Bilanzierer häufig über entsprechendes Zusatzwissen, beispielsweise ob veraltete Techniken innerhalb des Bilanzraumes berücksichtigt werden müssen. Die Abdeckung des auftretenden Wertebereichs ist eine Voraussetzung, die in vielen Fällen erfüllbar sein wird.

Die Standardabweichung des Mittelwertes hängt, wie Tabelle 5.1 aufzeigt, zusätzlich mit dem Umfang der Stichprobe zusammen. Dies liegt darin begründet, daß diese Größe ein Maß für die Sicherheit des bestimmten Mittelwertes darstellt. Ein Mittelwert, der auf 113 Werten beruht, ist naturgemäß gesicherter, als der einer kleineren Stichprobe. Auch Bereichsangaben liefern keinen entscheidenden Beitrag. Sie enthalten zwar wertvolle Informationen für die Streuung der Einzelwerte, aber nur sehr schwache Angaben über den Mittelwert.

Ausreichende Repräsentanz vorausgesetzt, können somit die empirischen Standardabweichungen und Standardabweichungen der Mittelwerte auch bei geringer Statistik als Streuungsmaß genutzt werden.

Als Kriterium für einen signifikanten Unterschied bietet sich die Forderung an, daß die $2s$ - beziehungsweise $2m$ -Intervalle nicht überlappen dürfen. Kann nicht sichergestellt werden, daß die zugrundeliegenden Daten den anfallenden Wertebereich abdecken, weil kein Datenintervall bekannt ist, ist eine $3s$ - bzw. $3m$ -Signifikanz zu fordern. Im folgenden wird unter Signifikanz stets eine $2s$ -Signifikanz verstanden.

Eine Fehlerabschätzung auf statistischer Basis kann nicht alle Ungenauigkeiten im Rahmen einer Sachbilanz wiedergeben. So entziehen sich beispielsweise die Auswirkungen von nicht weiterverfolgten Stoff- und Energieflüssen über die Bilanzgrenzen hinweg solange dem Konzept, wie sie nicht quantifiziert werden können. Die Bilanzgrenzen sind so zu wählen, daß die nicht verfolgten Stoff- und Energieströme klein sind. Daher kann davon ausgegangen werden, daß deren Auswirkungen auf die Gesamtbilanz ebenfalls klein sind. Methoden, den Einfluß vernachlässigter vorgelagerter Prozesse abzuschätzen, sind in Entwicklung [121].

Anders verhält es sich beim Auftreten von Kuppelprodukten oder nicht originärem Recycling. Hier können große Flüsse über die Bilanzgrenzen auftreten. Die Auswirkungen können also nicht a priori vernachlässigt werden.

Diese Unsicherheiten lassen sich mit einem statistischen Konzept nicht angemessen beschreiben, wie die folgende Überlegung verdeutlicht. Betrachtet man den Fall des nicht originären Recyclings, so fällt ein Rezyklat an, welches ganz oder teilweise zur Produktion anderer Güter eingesetzt wird. Wird dadurch in dieser anderen Prozeßkette eine entsprechende Menge Primärmaterial eingespart, so besteht eine Möglichkeit darin, die auf diese Weise vermiedenen Umweltbelastungen gutzuschreiben. Gleiche Herstellungsprozesse des Primärmaterials vorausgesetzt, läßt sich diese Gutschrift durch eine formale Rückkoppelung in die originäre Prozeßkette abschätzen.² Tritt ein Kuppelprodukt auf, lassen sich

²Durch Verunreinigungen oder sonstige Qualitätsänderungen können bei einer nicht originären Verwendung zusätzliche Belastungen oder Gewinne entstehen. So kann beispielsweise bei metallischen Rezyklaten der Bedarf an Legierungszusätzen gesenkt werden, da diese schon teilweise im Rezyklat vorliegen. Solche Effekte werden hier vernachlässigt.

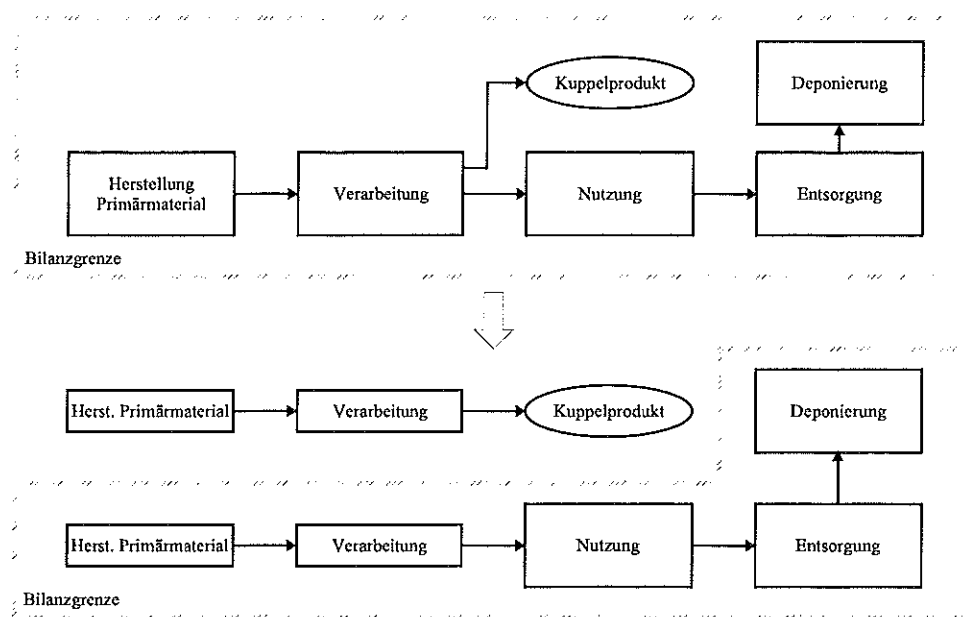


Abbildung 5.2: Umstrukturierung der Prozeßkette bei Berücksichtigung von Kuppelprodukten.

diesem die vorgelagerten Stoff- und Energieströme anteilig zuordnen. Der Eingriff in die Prozesskettenstruktur ist offensichtlich (siehe Abbildung 5.2). Eine Umstrukturierung des zugrundeliegenden Modells ist aber eine deterministische Maßnahme. Die daraus resultierenden Unsicherheiten sind daher ebenfalls deterministischer Natur.

Ergänzend zur statistischen Fehlerabschätzung lassen sich die Auswirkungen dieser Unsicherheiten in Szenarien diskutieren. Tabelle 5.2 zeigt die in der Herstellungs- und Nutzungsphase berücksichtigten Allokationen in Form der Szenarien „günstig“, „ungünstig“ und „Basis“. Im Szenario „günstig“ werden alle Randbedingungen so gewählt, daß die Bilanz für die jeweilige Rohkarosserie möglichst günstig ausfällt. Analog werden im Szenario „ungünstig“ die Rohkarosserien maximal belastet. Das Szenario „Basis“ stellt einen plausiblen Fall dar, der zwischen diesen Extrempositionen liegt und bei dem die Allokationen, wie in Abschnitt 4.2.1 und 4.2.2 erläutert, gewählt werden. Neben den Annahmen bezüglich Recycling und Allokationen wird als weitere Randbedingung das Modell zur Bereitstellung elektrischer Energie für die Schmelzflußelektrolyse zur Primäraluminiumgewinnung variiert. Alternativ zu dem in Abschnitt 4.2.5 diskutierten Modell wird abschätzungsweise eine Bereitstellung nach dem UCPT-Modell betrachtet. Die Hintergründe zu den jeweiligen Allokationsfaktoren in Tabelle 5.2 finden sich im Kapitel 4 in den Abschnitten 4.2.1 und 4.2.2.

Abbildung 5.3 zeigt den Einfluß von Herstellung, Betrieb und Treibstoffbereitstellung auf kumulierte Emissionen und Primärenergiebedarf im Szenario „Basis“ für einen Mittelklasse-Pkw mit Benzinmotor. In vielen Fällen hat die Nutzung, bestehend aus Betrieb und Treibstoffbereitstellung, einen dominanten Anteil. Dies gilt unabhängig von Antriebsart,

Tabelle 5.2: Szenarien, um Auswirkungen der Randbedingungen auf das Endergebnis abzuschätzen. Die Zahlen geben den Anteil an, mit dem die Kuppelprodukte belastet werden. Ihr Zustandekommen wird in den Abschnitten 4.2.1 und 4.2.2 diskutiert. Für die Bereitstellung der elektrischen Energie für die Primäraluminiumgewinnung aus Tonerde werden verschiedene Modelle diskutiert.

(Kuppel-) Produkt	Stoff-, Energie-Strom	Szenarien		
		„ungünstig“	„Basis“	„günstig“
Hochofen- gas	Energie	0	Energie- gutschrift	Energie- gutschrift
	CO ₂ ¹⁾	0	0,36	1
Hochofenschlacke	alle	0	0	0,25
Koks	alle	1	1	0,80
Stahlwerksschlacke	alle	0	0,60	0,10
Konverter- gas	Energie	0	Energie- gutschrift ²⁾	Energie- gutschrift ²⁾
	CO ₂	0	1	1
H ₂ -, Cl ₂ - Gas	el. Energie	0	0,477	1
	therm. Energie	0	0	1
	Steinsalz	0	0,607	1
	Emissionen	0	0,477	1
Neuschrott	alle	0	Substitution ³⁾	Substitution ³⁾
Altschrott	alle	0	0	Substitutions- gutschrift ⁴⁾
Primäraluminium Schmelzflußelektrolyse	el. Energie	UCPTE Modell	Modell nach 4.2.5	Modell nach 4.2.5

¹⁾CO₂, das bei vollständiger Verbrennung im Hochofen entstanden wäre.
²⁾Kuppelenergie wird Hauptprodukt Rohstahl gutgeschrieben.
³⁾Ersetzt Primärmaterial durch Einkopplung als Sekundärmaterial in Prozeßkette.
⁴⁾Wie Substitution, allerdings technisch nur bedingt realisierbar (siehe 4.2.4).

Fahrzeugklasse oder Szenario. Die Nutzungsphase ist dem gesamten Pkw anzulasten. Aus der Frage, welcher Anteil der Rohkarosserie zuzurechnen ist, ergibt sich ein bisher nicht behandeltes Allokationsproblem. Dieses Problem läßt sich jedoch umgehen. Als Ziel der Untersuchung wurde in Abschnitt 4.1 festgelegt, die Änderungen innerhalb der Sachbilanzkategorien und ihre Signifikanz bei Austausch einer konventionellen Stahlrohkarosserie gegen eine in Leichtbauweise zu bestimmen. Demzufolge sind auch in der Nutzungsphase nur die Änderungen hervorgerufen durch die Massenreduktion relevant, wie sie in Abschnitt 4.2.3 bestimmt werden. Es wird nicht der gesamte Treibstoffbedarf der Karosse-

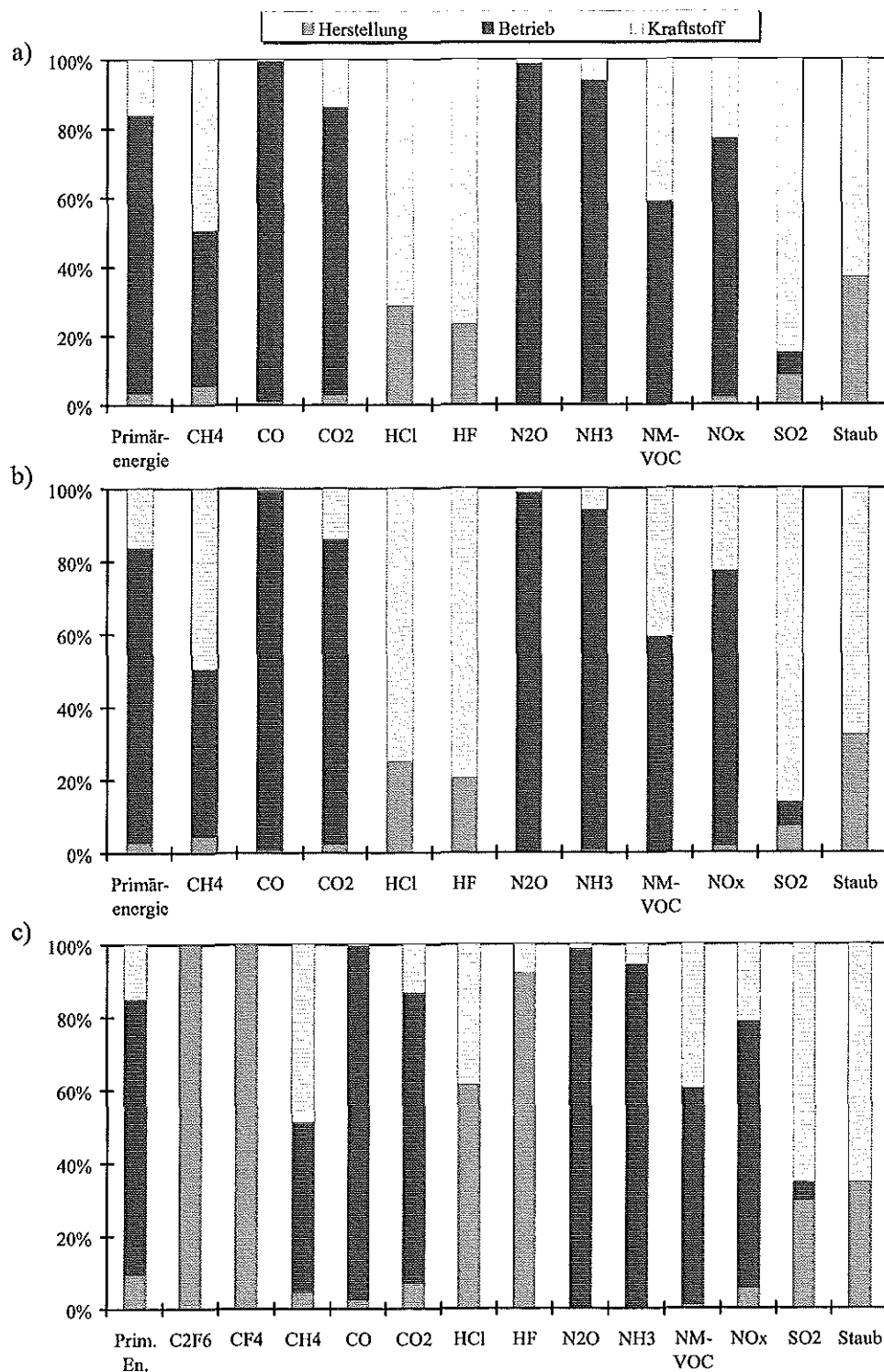


Abbildung 5.3: Anteil von Herstellung einer Rohkarosserie sowie Betrieb und Treibstoffbereitstellung eines Mittelklasse-Pkw mit Benzinmotor im Szenario „Basis“ an den Emissionen und Primärenergiebedarf des Lebenszyklusses. a) Konventionelle Stahlkarosserie, b) Stahl-Leichtkonstruktion, c) Aluminiumkarosserie.

rievarianten miteinander verglichen, sondern die Einsparungen durch die Leichtbauversionen berücksichtigt. Um nicht mit negativen Emissionen rechnen zu müssen, werden die Einsparungen durch Einsatz der leichteren Aluminiumkarosserie als Mehrbedarf der Stahlrohkarosserien interpretiert (siehe auch Abschnitt 4.2.3).

5.1 Herstellung und Entsorgung

Da die Bilanzierung der Nutzungsphase ein untypisches Vorgehen erfordert, wie in Abschnitt 4.2.3 erkennbar, wird zunächst die Herstellungs- und Entsorgungsphase mit den ermittelten Standardabweichungen näher betrachtet.

Abbildung 5.4 zeigt die Ergebnisse bezüglich der Primärenergie für die Rohkarosserien aus Stahl und Aluminium eines Mittelklasse-Pkw im Szenario „Basis“. Die Fehlerbalken geben die einfache Standardabweichung wieder. Die grundlegenden Randbedingungen des Szenarios sind in Tabelle 5.2 dokumentiert. Die einzelnen Energieträger werden zur besseren Vergleichbarkeit primärenergetisch bewertet. Dazu werden die berechneten Fördermengen der fossilen Energieträger mit ihrem unteren Heizwert nach Tabelle 4.19 bewertet. Die primärenergetische Bewertung von Strom aus Kernkraft- und Wasserkraftwerken wird in Abschnitt 4.2.5 erläutert.

Es zeigt sich, daß die Fehlerbalken recht groß sind. Betrachtet man die Emissionen in die Luft, die in Abbildung 5.5 dargestellt sind, so nimmt die Größe der Fehlerbalken weiter zu. Die Standardabweichung beschreibt die Streuung der Einzeldaten. Mit ihrer Hilfe läßt sich abschätzen, wie weit sich die Verteilungen überlappen. Diese Information ist insbesondere dann hilfreich, wenn herstellersistemspezifische und damit Daten geringer Streuung betrachtet werden. Unter solchen Voraussetzungen kann die Frage nach der Sicherheit, mit der erwartete Effekte in allen Fällen eintreten, durchaus von Interesse sein. Die Aussagekraft einer solchen herstellersistemspezifischen Prozeßkette mit speziellen Zulieferern kann allerdings bereits durch den Wechsel eines Zulieferers in Frage gestellt werden.

Betrachtet man die Frage, welche der untersuchten Optionen im Mittel Vorteile aufzeigt und wie groß diese sind, stellt die Standardabweichung des Mittelwertes ein weitaus geeigneteres Maß dar. Sie beschreibt die Signifikanz von Unterschieden zwischen Mittelwerten. In der Physik wird sie daher als „Standardfehler“ bezeichnet und interpretiert. Abbildung 5.6 und 5.7 zeigen Primärenergieaufwand und Emissionen in die Luft für die Herstellungsphase mit der einfachen Standardabweichung des Mittelwertes als Fehlerbalken. Erwartungsgemäß ist dieses Streuungsmaß deutlich kleiner als die Standardabweichung. Betrachtet man die Staubemissionen bei der Herstellung der Stahlkarosserie, so liegt die relative Standardabweichung des Mittelwertes in der Größenordnung von 50%. Entsprechend den Erläuterungen in Abschnitt 3.1 und 3.2 transportiert die Fehlerabschätzung hier nur die Information, daß der Wert die Qualität eines Anhaltswertes hat. Begründet liegt die große Streuung des Wertes in den widersprüchlichen Angaben verschiedener Quellen, bei denen vermutlich verschiedene Emissionsquellen betrachtet oder ausgeklammert werden und denen unterschiedliche Umweltstandards zugrunde liegen. Glaubwürdig ist bei dieser Angabe also lediglich die Größenordnung und als Vergleichswert kann sie allen-

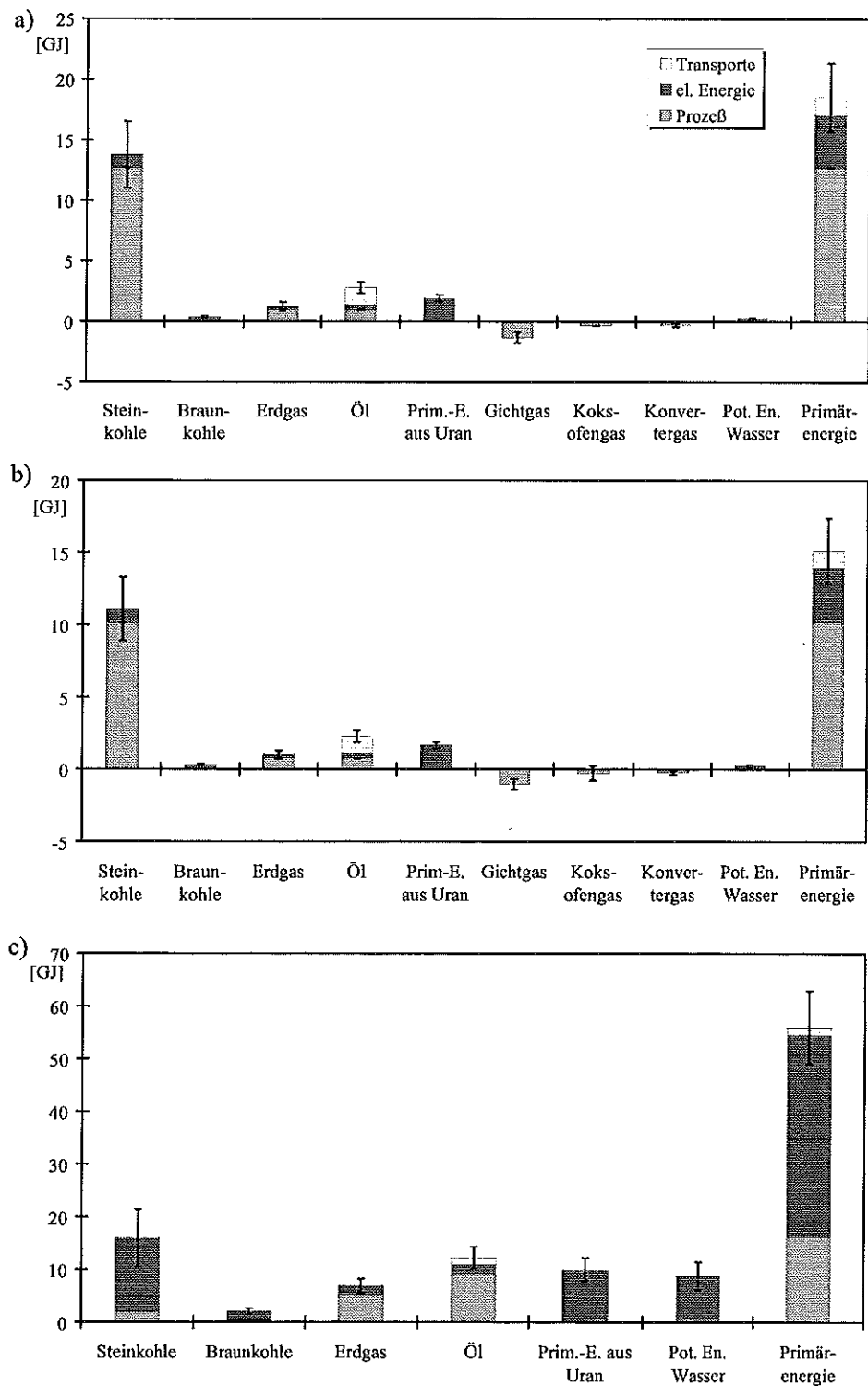


Abbildung 5.4: Primärenergiebedarf zur Herstellung von Rohkarosserien von Mittelklasse-Pkw. Die Fehlerbalken geben die einfache Standardabweichung wieder. a) Konventionelle Stahlkarosserie, b) Stahl-Leichtkonstruktion, c) Aluminiumkarosserie.

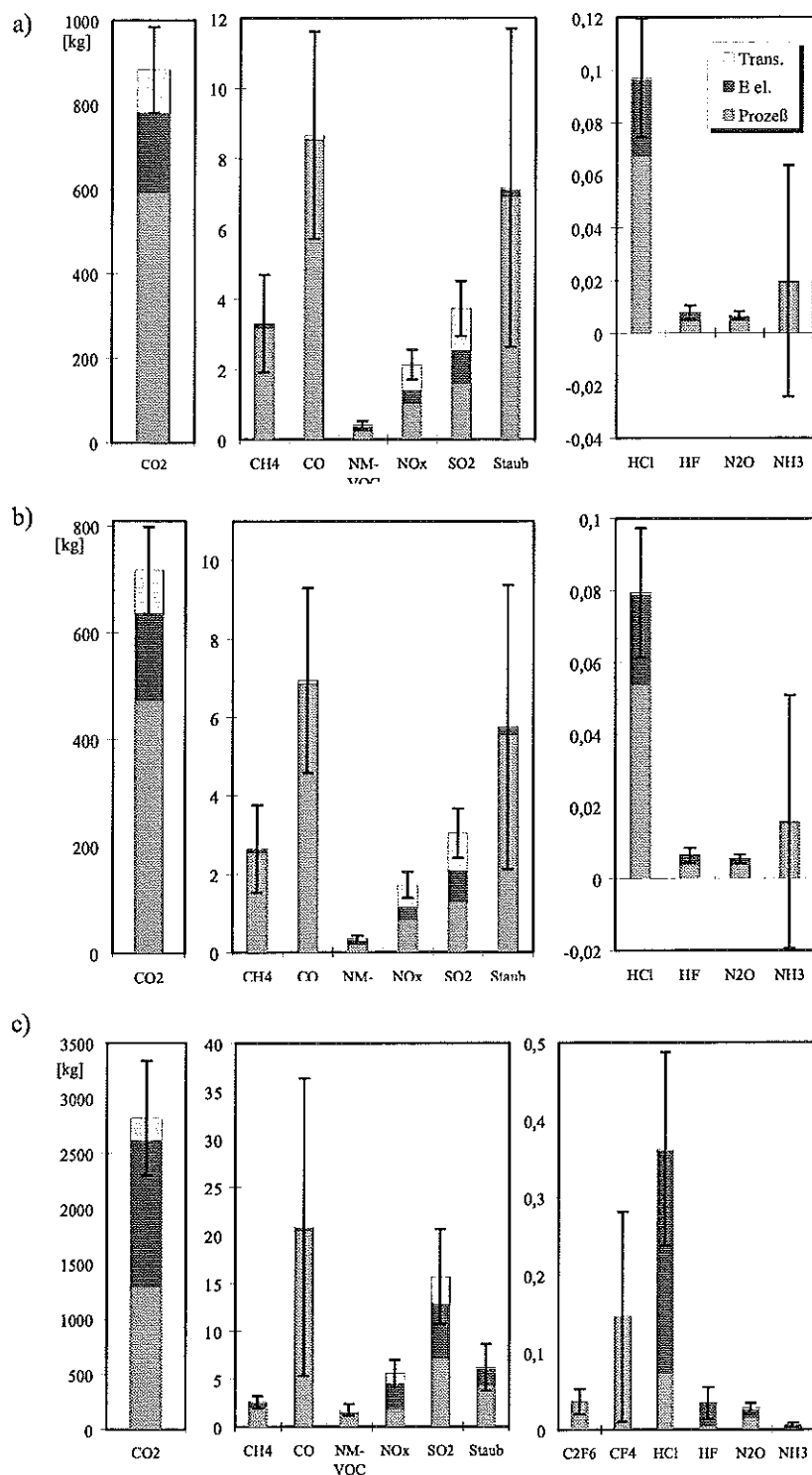


Abbildung 5.5: Luftseitige Emissionen der Herstellung von Karosserien von Mittelklasse-Pkw aus Stahl und Aluminium im Szenario „Basis“. Die Fehlerbalken geben die jeweilige einfache Standardabweichung wieder. a) Konventionelle Stahlkarosserie, b) Stahl-Leichtkonstruktion, c) Aluminiumkarosserie.

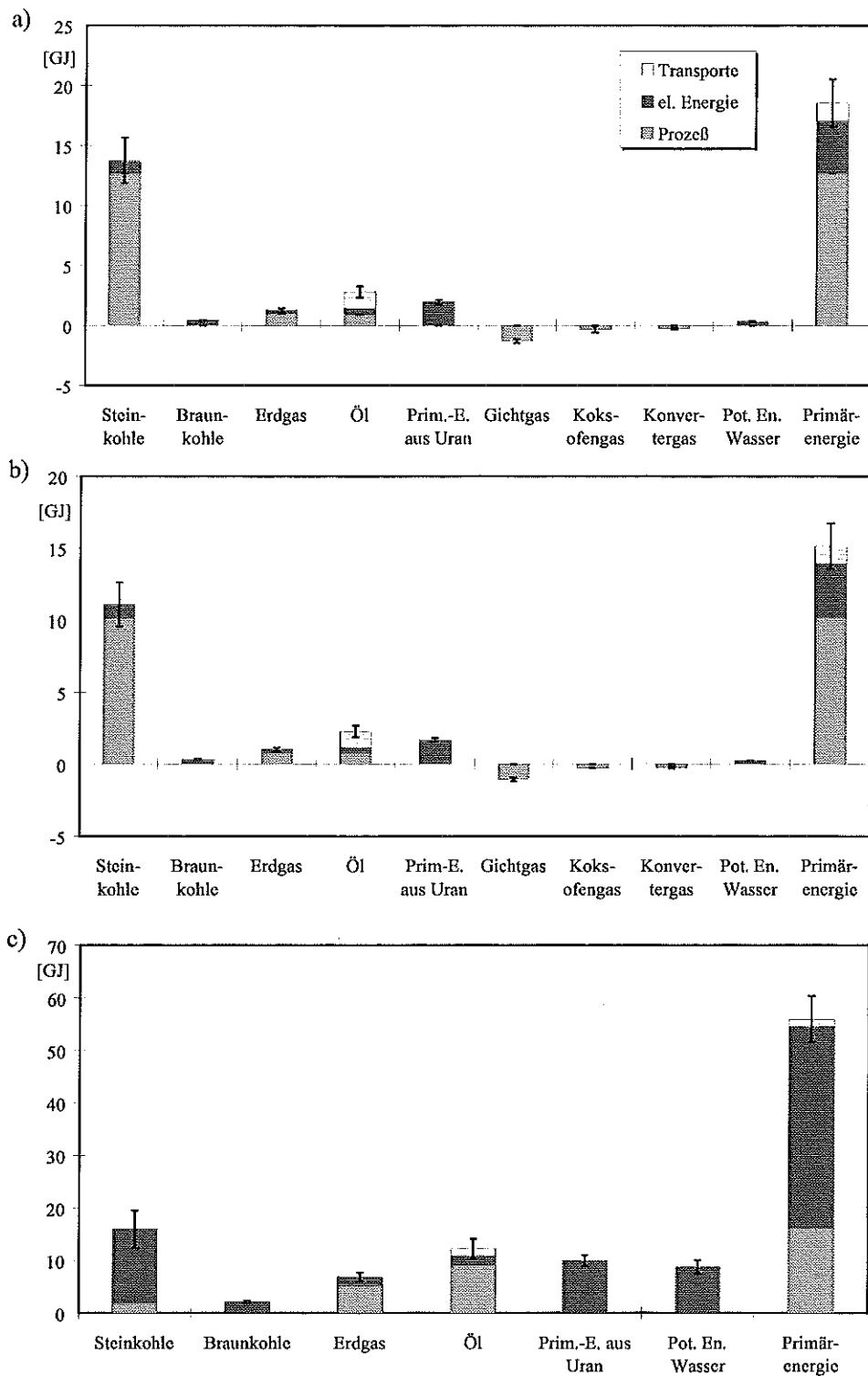


Abbildung 5.6: Primärenergiebedarf zur Herstellung einer Rohkarosserie eines Mittelklasse-Pkw im Szenario „Basis“. Die Fehlerbalken geben die einfache Standardabweichung des Mittelwertes wieder. a) Konventionelle Stahlkarosserie, b) Stahl-Leichtkonstruktion, c) Aluminiumkarosserie.

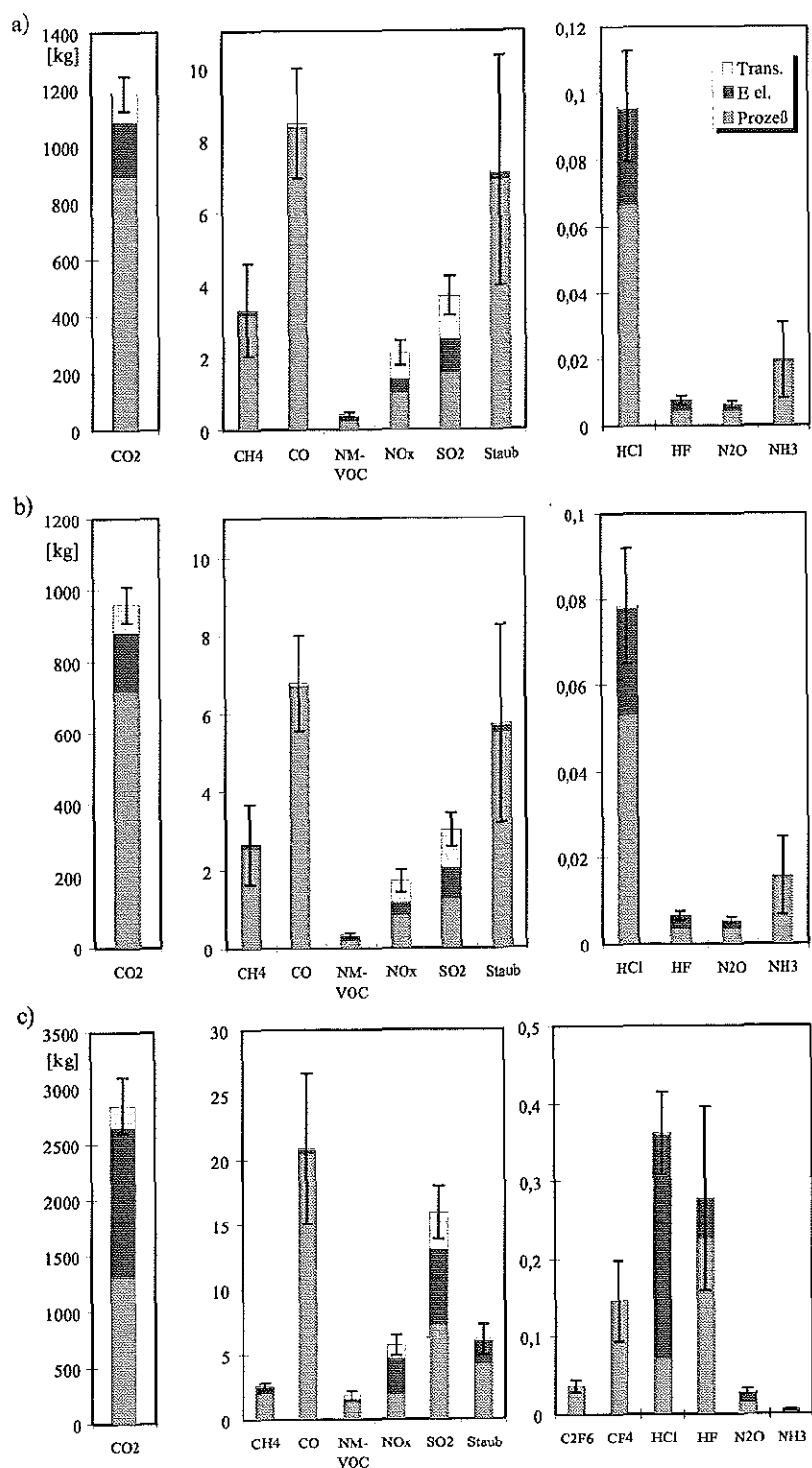


Abbildung 5.7: Luftseitige Emissionen der Herstellung von Karosserien eines Mittelklasse-Pkw aus Stahl und Aluminium im Szenario „Basis“. Die Fehlerbalken geben die einfache Standardabweichung des Mittelwertes wieder. a) Konventionelle Stahlkarosserie, b) Stahl-Leichtkonstruktion, c) Aluminiumkarosserie.

falls gegenüber einem Wert anderer Größenordnung dienen.

Die Abschätzung der Streuung der C_2F_6 - und CF_4 -Emissionen aus der Prozeßkette der Primäraluminiumgewinnung basiert nur auf drei beziehungsweise vier Werten. Die Werte repräsentieren sicher nicht in angemessener Weise die auftretenden Streuungen, da nicht alle eingesetzten Techniken erfaßt werden. Die Verlässlichkeit der Streumaße ist demzufolge gering und die daraus resultierenden Vertrauensintervalle für den Mittelwert sehr groß (siehe auch Abschnitt 3.1).

Um die Stabilität der ermittelten Streuungen gegenüber dem Fehlerschätzparameter c_s zu analysieren, wurde für den Fall des Mittelklasse-Pkw mit Ottomotor die Rechnung mit $c_s = 0$ und $c_s = 1$ durchgeführt und mit dem Standardwert $c_s = 0,5$ verglichen. Das Resultat für die relative Standardabweichung des Mittelwertes zeigt Abbildung 5.8. Es zeigt sich eine prinzipiell geringere Abhängigkeit beim Primärenergiebedarf im Vergleich zu den Emissionen. Dies überrascht nicht, findet man doch wesentlich mehr Quellen zum Energieeinsatz.

Die Änderung des Fehlerschätzparameters macht sich bei der Stahlvariante am stärksten beim Öleinsatz bemerkbar. Dies hat seine Ursache in den konservativ veranschlagten Schätzfehlern im Transportmodul, die in Abschnitt 4.2.6 begründet werden. Bei der Aluminiumkarosserie spielen Transporte aufgrund des höheren Primärenergiebedarfs bei der Reduktion vom Oxid zum Metall eine geringe Rolle. Demzufolge entsteht auch eine geringe Abhängigkeit des Ölbedarfs vom Fehlerschätzparameter. Die größere Sensibilität im Bereich des Erdgaseinsatzes auf diese Parametervariation erklärt sich aus den im Vergleich zur Stahlherstellung weniger gut aufgeschlüsselten Angaben. Während bei der Stahlherstellung im komplizierten Energieverbund eines integrierten Hüttenwerkes die Art der eingesetzten Energieträger in verschiedener Hinsicht relevant und demzufolge gut dokumentiert ist, gilt vergleichbares für die Aluminiumherstellung nicht.

Die Sensitivitäten der Standardabweichung des Mittelwertes bei den Emissionen von Stick- und Schwefeloxiden liegen wiederum in den Unsicherheiten des Transports begründet. Ursache ist der relevante Beitrag in diesen Bereichen, wie Abbildung 5.7 zu entnehmen ist. Die restlichen Sensitivitäten resultieren aus dem geringen Umfang der Datengrundlage im Bereich geringer Emissionen.

Insgesamt bleibt festzuhalten, daß die Standardabweichung des Mittelwertes des jeweiligen Energiebedarfs und der Emissionen im Bereich von zehn Prozentpunkten gegenüber dem Fehlerschätzparameter stabil ist.

Den Einfluß der Szenarien „günstig“ und „ungünstig“ auf den Primärenergiebedarf und die Emissionen machen die Abbildungen 5.9 bis 5.11 deutlich.

Zusätzlich zu den in Tabelle 5.2 diskutierten Szenarien wird für die konventionelle Stahlrohkarosserie und die Aluminiumkonstruktion das Szenario „günstig o. Rec.“ ausgewertet. Dieses Szenario ist mit der Variante „günstig“ identisch bis auf die Rückführung des Altschrotts, es wird kein Primärmaterial ersetzt. Da in dieser Variante keine Aufbereitungsprozesse zum Sekundärrohstoff eingehen, kann die Standardabweichung des Mittelwertes angegeben werden.

Wird der Primärenergiebedarf nach Abbildung 5.9 betrachtet, so finden sich für keine Karosserievariante signifikante Unterschiede zwischen den Szenarien „Basis“ und

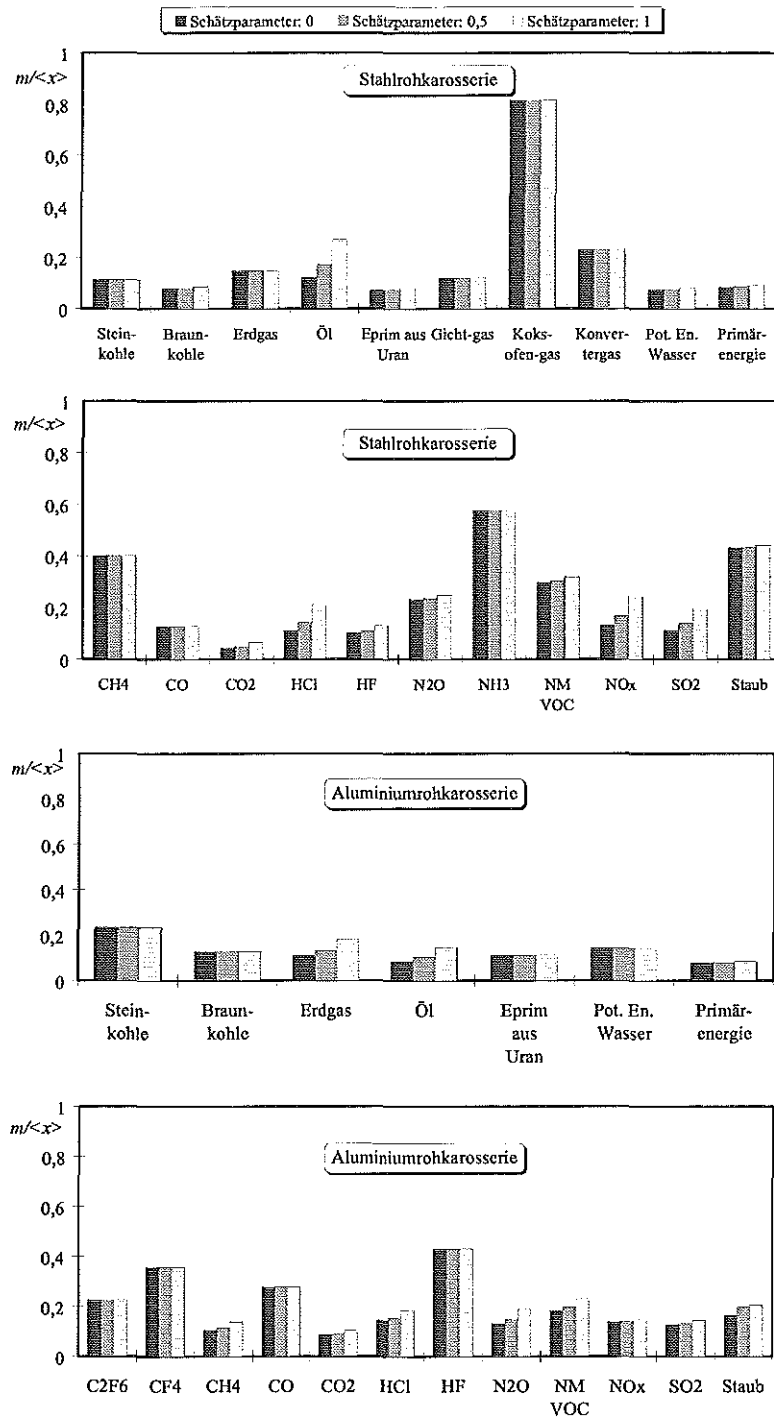


Abbildung 5.8: Einfluß des Fehlerschätzparameters auf die relative Standardabweichung des Mittelwertes für die Herstellung einer Rohkarosserie aus Stahl und Aluminium für einen Mittelklasse-Pkw im Szenario „Basis“. (m : Standardabweichung des Mittelwertes, $\langle x \rangle$: Mittelwert)

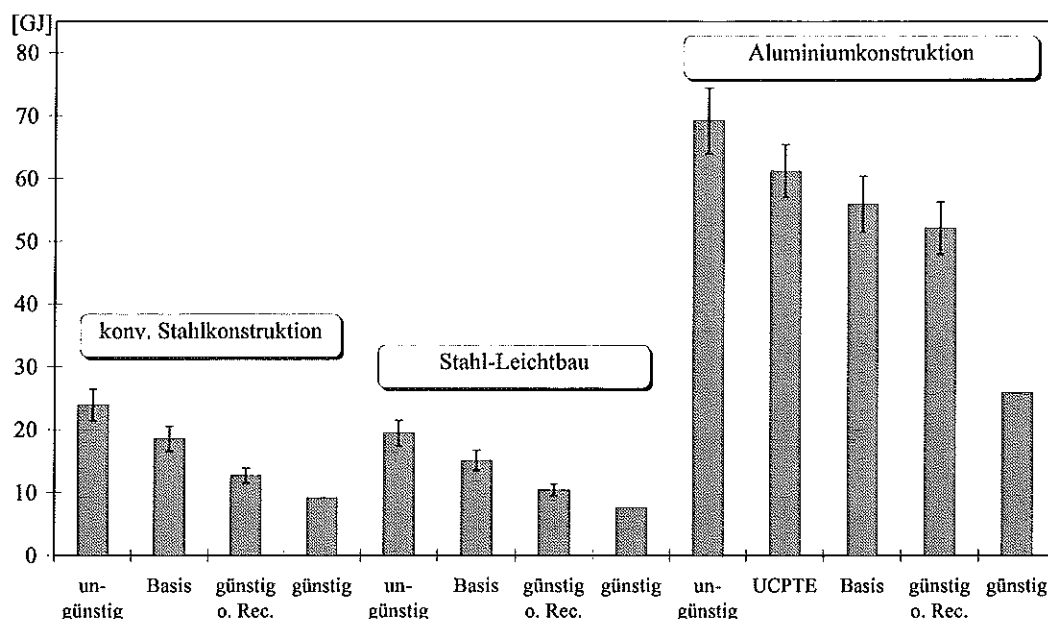


Abbildung 5.9: Einfluß der Szenarien auf den Primärenergiebedarf zur Herstellung einer Pkw-Rohkarosserie.

„ungünstig“. Ein Vergleich der Varianten „günstig“ und „günstig o. Rec.“ zeigt auf, daß der Frage der Altschrottbewertung eine Schlüsselrolle für die Herstellungs- und Entsorgungsphase zukommt. Bei der Stahlkarosserie hat die Substitutionsgutschrift für das Altschrottrecycling einen Anteil von etwa 40% an der gesamten Absenkung des Primärenergiebedarfs im Szenario „günstig“ gegenüber dem Basisfall. Für die Aluminiumkarosserie läßt sich ein Anteil von 2/3 an der Absenkung beobachten.

Das Szenario „UCPTE“ in Abbildung 5.9 ist bis auf die Bereitstellung elektrischer Energie zur Schmelzflußelektrolyse bei der Primäraluminiumherstellung identisch mit dem Basisfall. Anstelle der Verknüpfung mit dem Modell gemäß Abschnitt 4.2.5 wird unterstellt der Strom werde dem UCPTE-Netz entnommen. Es zeigt sich, daß dieser vieldiskutierte Punkt nicht zu signifikanten Auswirkungen führt.

Der Fall „ungünstig“ macht deutlich, daß entsprechende in Tabelle 5.2 dokumentierte Randbedingungen keine signifikanten Auswirkungen bezüglich des Basisszenarios zeigen. Bei den Emissionen zeigt sich ein analoges Bild, wie in Abbildung 5.10 bis 5.11 dargestellt. Die Emissionen, verursacht durch die Herstellung der Stahlrohkarosserie, schwanken meist nicht signifikant. Statistisch signifikante Effekte ergeben sich für CO_2 , wo sich die Allokation des Kohlendioxids aus dem Hochofen stark bemerkbar macht. Die niedrigeren HCl-Emissionen im Szenario „ungünstig“ gegenüber dem Basisfall erklären sich daraus, daß kein Neuschrott eingesetzt wird. Im Szenario „günstig“ wird unterstellt, der Neuschrott, der nicht als Kühltisch eingesetzt werden kann, wird im Lichtbogenofen eingeschmolzen. Dies erhöht den Bedarf an elektrischer Energie und die damit verknüpften HCl-Emissionen. Im Szenario „ungünstig“ findet keine Aufbereitung der Neuschrotte

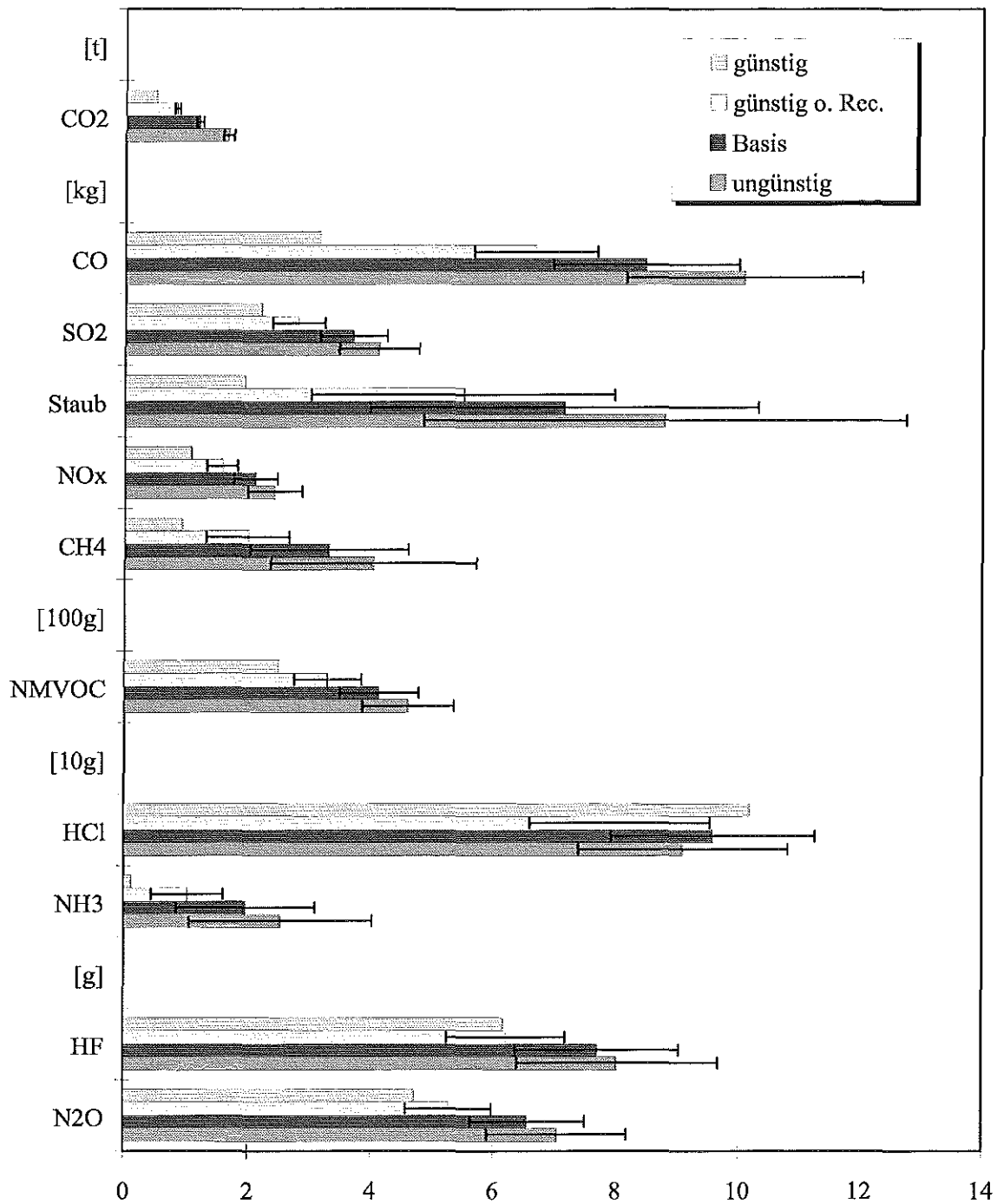


Abbildung 5.10: Einfluß der Szenarien auf die Emissionen bei der Herstellung einer Pkw-Rohkarosserie der Mittelklasse als konventionelle Stahlkonstruktion.

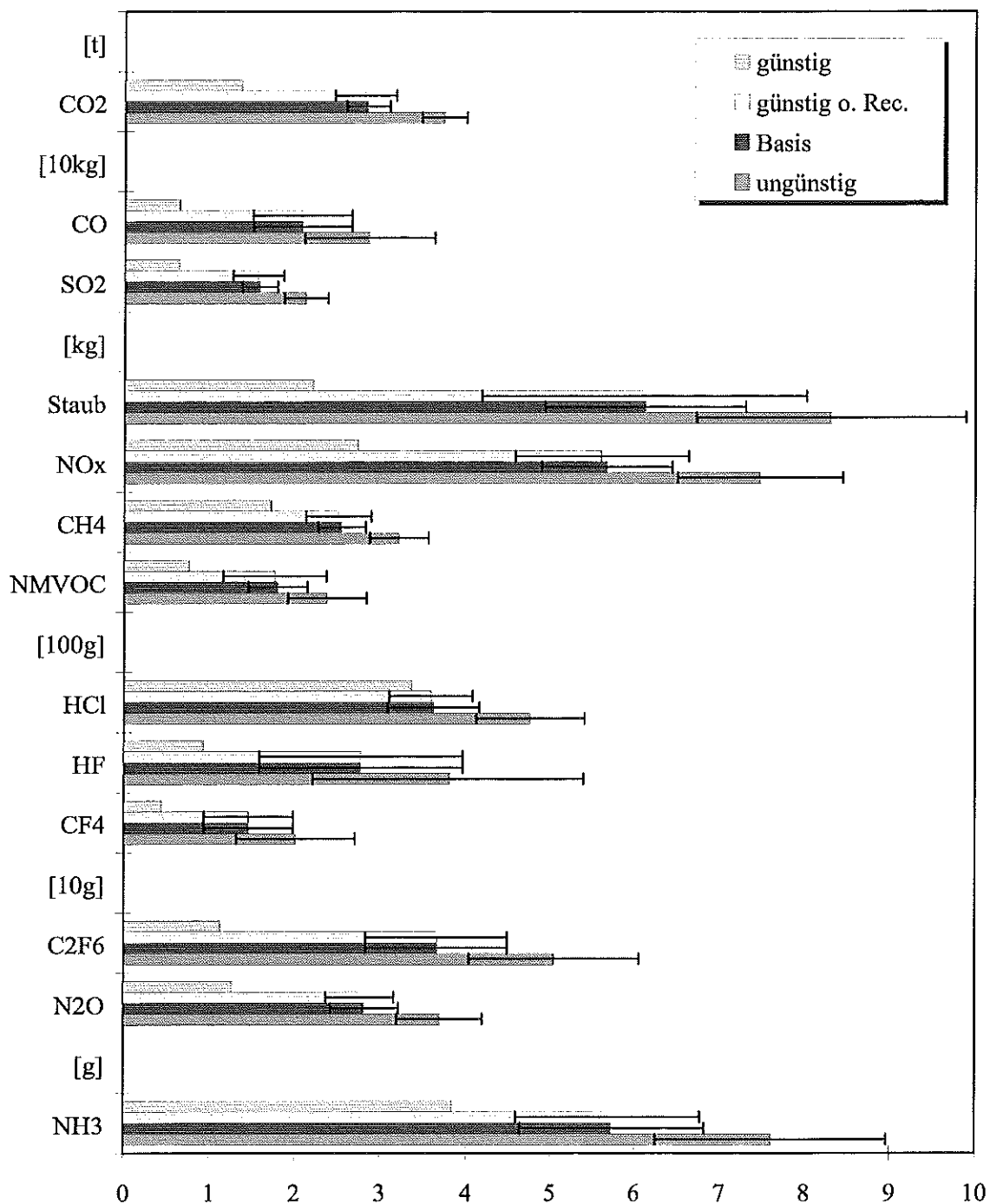


Abbildung 5.11: Einfluß der Szenarien auf die Emissionen bei der Herstellung einer Pkw-Rohkarosserie der Mittelklasse als Aluminiumkonstruktion.

im Elektrolichtbogenofen statt.

Für die Leichtbauversion aus Stahl unterscheidet sich die ausgewertete Prozeßkette nicht. Es ergibt sich daher für diese Option ein zu Abbildung 5.10 analoges Bild. Die Werte sind jeweils entsprechend dem Leichtbaugrad um 20% kleiner.

Im Falle der Rohkarosserie aus Aluminium läßt sich qualitativ ein ähnliches Verhalten bei den Emissionen wie bei der Primärenergie beobachten. Die Berücksichtigung des Altschrottrecyclings führt zu deutlichen Effekten, verglichen mit den statistischen Streuungen.

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß die Frage der Altschrottbewertung für die Herstellungs- und Entsorgungsphase eine Schlüsselrolle besitzt. Alle anderen Randbedingungen sind nicht signifikant und werden somit durch den statistischen Fehler hinreichend miterfaßt. Da die Nutzungsphase unabhängig von den Herstellungsszenarien ist, reicht es im folgenden aus, die Szenarien "günstig" und "Basis" zu diskutieren.

5.2 Gesamter Lebensweg

Neben dem bereits diskutierten Allokationsproblem, welcher Anteil der nutzungsbedingten Stoff- und Energieflüsse der Rohkarosserie zuzuordnen sind, gehen in der Nutzungsphase noch weitere Randbedingungen ein. Sie werden im folgenden erläutert und ihre Auswirkungen auf die Ergebnisse am Ende des Abschnitts diskutiert.

Für die relative Massenreduktion der Rohkarosserien, dem Leichtbaugrad, konnten keine Streuungen ermittelt werden. Der Leichtbaugrad der Aluminiumkarosserie (35%) und der Stahl-Leichtbaukonstruktion (20%) gehen daher als exakte Parameter ein und werden variiert.

Darüber hinaus liegen keine Angaben für die Abhängigkeit des Leichtbaugrades von den Fahrzeugklassen vor. Es wurde daher für alle Klassen mit der gleichen relativen Massenreduktion gerechnet.

Die Verringerung der Karosseriemasse zieht Sekundäreffekte nach sich. Darunter versteht man die Anpassung von Fahrwerk, Aggregaten, Tankgröße und ähnliches. Nach [122] erhöht dies die Massenreduktion Δm um 35% auf $1,35 \Delta m$. Damit eröffnet sich ein weiteres Allokationsproblem. Es stellt sich die Frage, wie die Treibstoffeinsparung in der Nutzungsphase aufgrund der sekundären Massenreduktion auf die Rohkarosserie und die betroffenen Bauteile aufzuteilen ist. Modifikationen dieser Bauteile und die Änderungen der damit verknüpften Stoff- und Energieströme können angesichts der Vielzahl komplizierter Bauteile nicht weiter verfolgt werden.

Für die Zusammensetzung der Straßenarten und Fahrzustände werden die Angaben des TÜV Rheinland übernommen [70]. Streuungen dieser Anteile sind nicht bekannt, so daß ein mittleres Fahrverhalten wiedergegeben wird.

Wie bereits erläutert, ist für den Vergleich der Karosserievarianten allein die Treibstoffersparnis relevant. Nichtsdestotrotz ist die Frage nach dem absoluten Minderungspotential dieser Leichtbaumaßnahme interessant. Abbildung 5.12 zeigt die Minderung von Primärenergiebedarf, Kohlen- und Schwefeldioxidemissionen in der Nutzungsphase. Diese

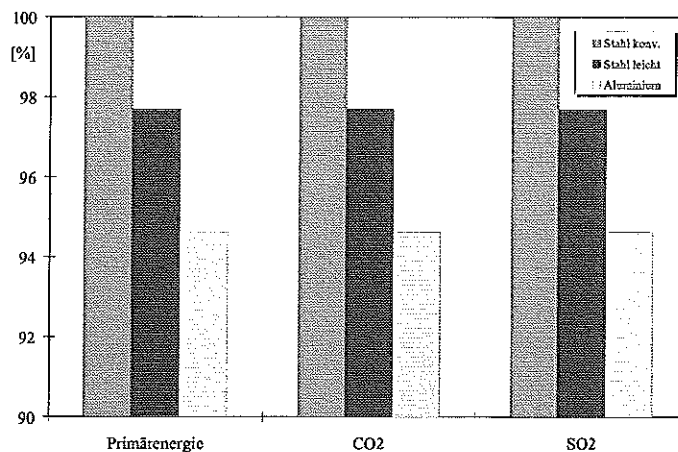


Abbildung 5.12: Minderungspotentiale durch eine Leichtbaukarosserie der Mittelklasse in der Nutzungsphase. Dargestellt sind nur die Kategorien, bei denen auch direkt im Betrieb Minderungen durch Leichtbau auftreten.

Sachbilanzgrößen wurden ausgewählt, weil sie direkt mit dem Treibstoffverbrauch korreliert sind. Dieses Potential stellt eine obere Grenze dar, da Herstellung und Entsorgung einer Aluminiumkarosserie zumindest gleich hohen Primärenergieaufwand erfordert und zumindest gleich hohe Kohlen- und Schwefeldioxidemissionen verursacht. Andere Emissionen sind lediglich über die Treibstoffbereitstellung mit dem Leichtbau verknüpft, wie in Abschnitt 4.2.3 diskutiert.

Es ist nicht überraschend, daß das Minderungspotential im Bereich von 5% liegt, da eine isolierte Leichtbaumaßnahme betrachtet wird. Auf die Rohkarosserie entfällt etwa ein Viertel der Pkw-Masse. Antriebseinheit, Fahrwerk und Ausstattung verursachen ebenfalls je ein Viertel der Masse. Unterstellt man, daß eine ähnliche Massenreduktion in den Bereichen Antriebseinheit und Fahrwerk möglich ist, ergibt sich ein Minderungspotential von ca. 15% für Leichtbaumaßnahmen generell.

Wird, wie oben diskutiert, die Nutzungsphase als Mehrverbrauch der Stahlkarosserien berücksichtigt, so ergibt sich für den Lebenszyklus das Ergebnis nach Abbildung 5.13.

Mit Einbezug der Nutzungsphase ergibt sich nun folgendes Bild. Zwischen der konventionellen Stahlrohkarosserie und der Rohkarosserie aus Primäraluminium ohne Recyclinggutschrift besteht energetisch kein signifikanter Unterschied. Analog ergibt sich für die Stahl-Leichtbauweise im Vergleich zur Aluminiumrohkarosserie bei vollständiger Substitutionsgutschrift für den Altschrott keine gesicherten Vorteile. Ob durch Einführung einer Aluminiumkarosserie ein energetischer Vorteil bei ganzheitlicher Betrachtung entsteht, hängt also davon ab, wie weit sich Leichtbaupotentiale in Stahlkonstruktionen umsetzen lassen und wie sich die Recyclingkreisläufe des Aluminiumknetschrotts entwickeln.

Werden mit Kohlendioxid und Schwefeldioxid die beiden unmittelbar vom Treibstoffverbrauch beeinflussten Emissionen betrachtet, so ergibt sich, wie Abbildung 5.14 a zeigt, für

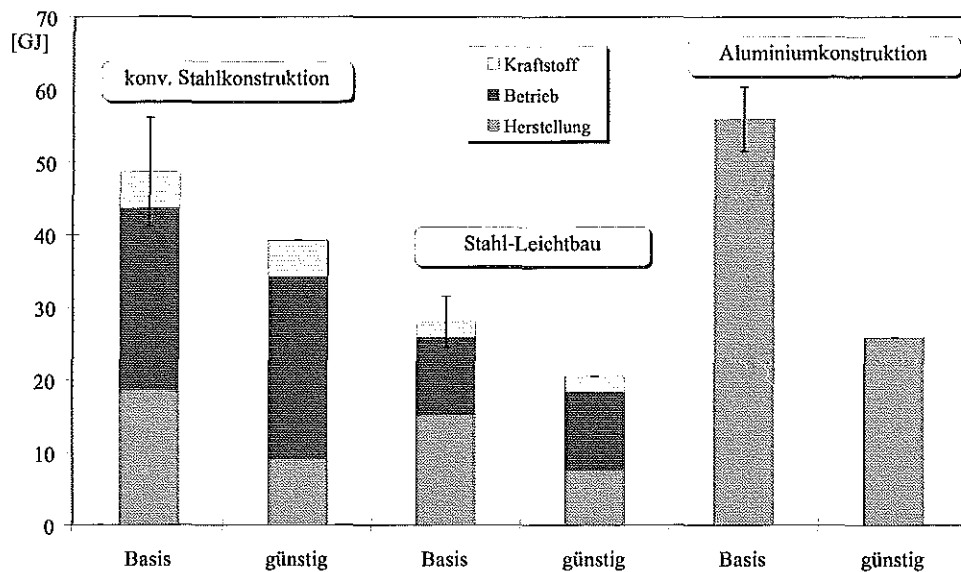


Abbildung 5.13: Primärenergieeinsatz über gesamten Lebensweg einer Rohkarosserie für Mittelklassefahrzeuge mit Ottomotor. Die Aufwendungen für die Herstellung und die Mehraufwendungen im Betrieb des Fahrzeugs sowie der Kraftstoffbereitstellung sind getrennt ausgewiesen.

CO₂ ein analoges Bild. Obige Aussagen lassen sich uneingeschränkt übernehmen. Im Falle des Schwefeldioxids zeigen sich jedoch signifikante Vorteile für die Stahlvarianten, solange von einer Gutschrift für das Recycling des Aluminiumaltschrotts abgesehen wird. Mit etwa 50% stammt ein großer Teil der SO₂-Emission bei der Aluminiumerzeugung aus dem Elektrolyse-Prozeß. Ursache dabei sind Anodenabbrand und Bereitstellung elektrischer Energie. Bei der Roheisenerzeugung im Hochofen liegt zwar der Koksverbrauch in gleicher Größenordnung mit dem Anodenabbrand pro Kilogramm Metall, doch der Schwefel lagert sich anteilig in der Hochofenschlacke ab und löst sich im Roheisen. Im Szenario „günstig“ nivellieren sich die Unterschiede weitgehend.

Für die übrigen Emissionen, die in der Nutzungsphase mit dem Treibstoffbedarf nur über die Treibstoffbereitstellung korreliert sind, reicht es nach den Abbildungen 5.10 und 5.11 aus, die Szenarien „Basis“ und „günstig“ zu betrachten. Die Ergebnisse zeigt Abbildung 5.15 für die Stahl-Leichtbaukonstruktion und die Aluminiumkarosserie auf. In Anhang E und Abschnitt 4.2.3 finden sich die Resultate tabelliert für alle Karosserievarianten. Betrachtet man zunächst mit dem Basisfall die Produktion aus Primärmaterial, so zeigt Abbildung 5.15 für die Aluminiumkarosserie signifikant erhöhte Emissionen in den Bereichen NO_x, Flußsäure, CF₄, C₂F₆ und Lachgas. Die großen Fehlerbalken der Flußsäure-, CF₄- und C₂F₆-Emissionen zeigen an, daß nur Anhaltswerte vorliegen. Da aber der Unterschied im Bereich von Größenordnungen liegt, ist obige Schlußfolgerung zulässig. Signifikant niedrigere Emissionen finden sich im Falle des Chlorwasserstoff.

Gelingt es, gemäß dem Szenario „günstig“, den gesamten anfallenden Schrott, nach Auf-

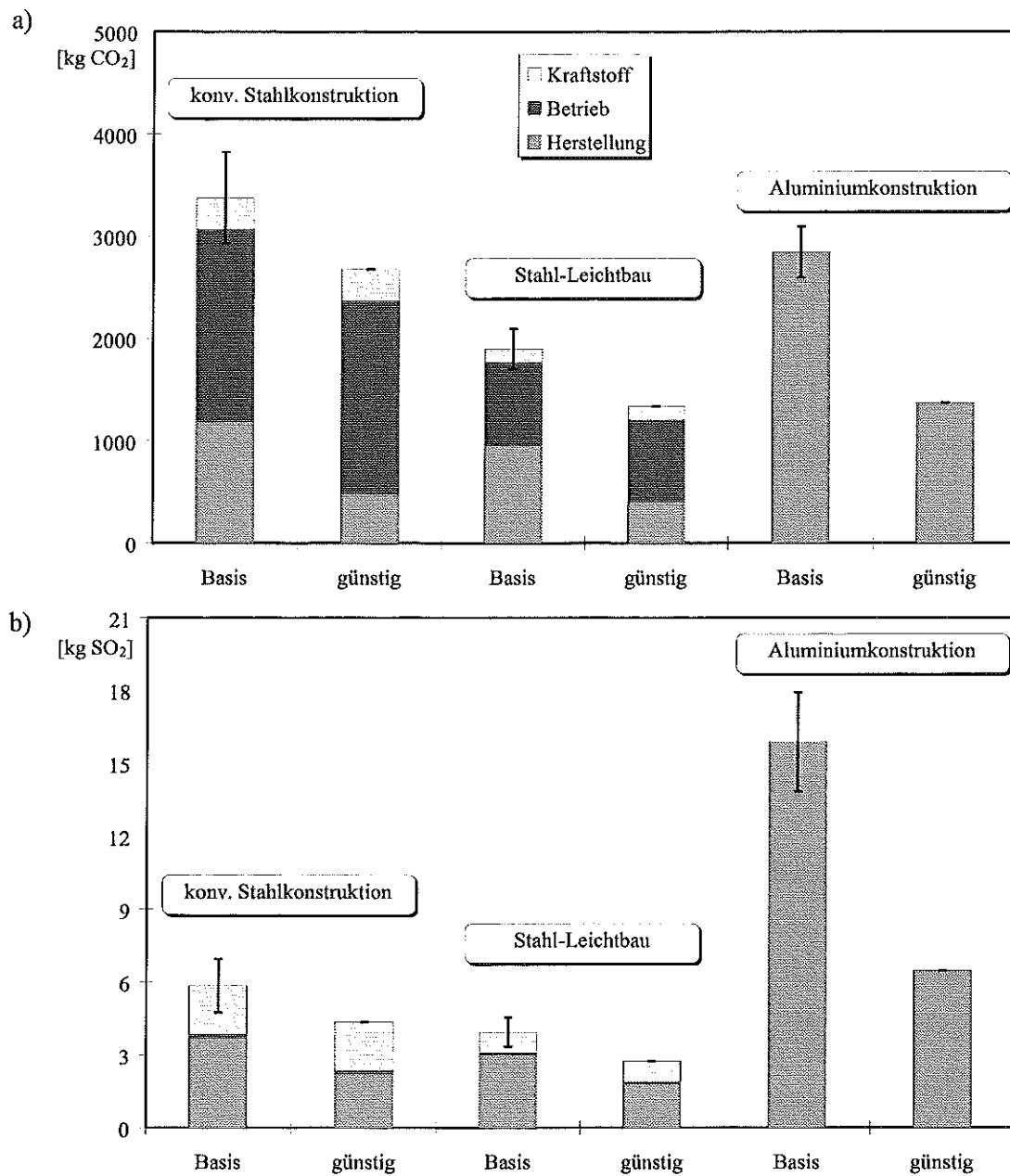


Abbildung 5.14: (a) Kohlendioxid- und (b) Schwefeldioxid-Emissionen über gesamten Lebensweg einer Rohkarosserie für Mittelklassefahrzeuge mit Ottomotor. Die Emissionen bei Herstellung und die zusätzlichen Emissionen gegenüber der Aluminiumvariante im Betrieb des Fahrzeugs sowie bei der Kraftstoffbereitstellung sind getrennt ausgewiesen.

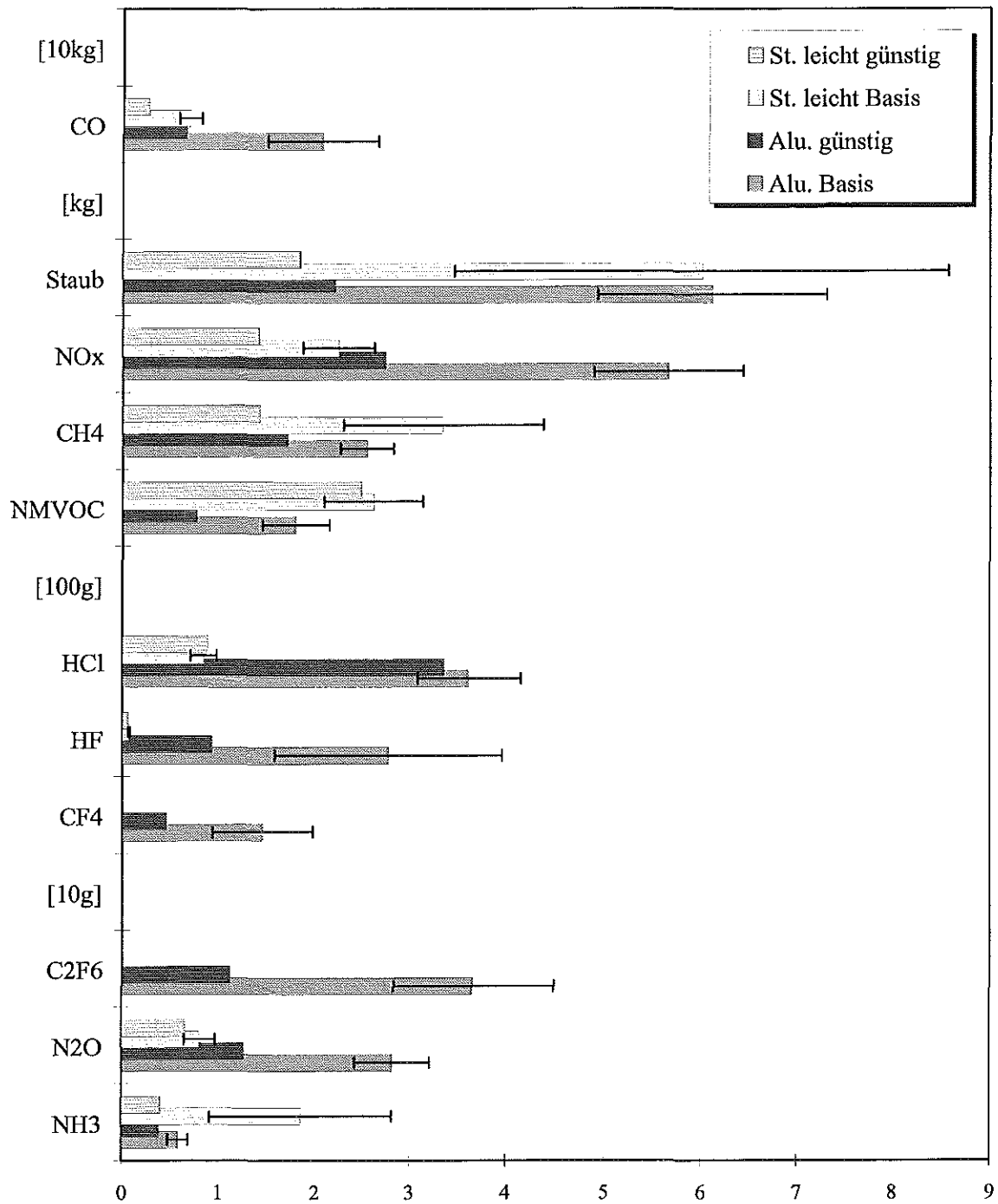


Abbildung 5.15: Von Treibstoffeinsparung im Betrieb nicht direkt beeinflusste Emissionen über gesamten Lebensweg von typischen Rohkarosserien für Pkw der Mittelklasse mit Ottomotor.

arbeitung zum Sekundärrohstoff, zur Substitution von Primärmaterial einzusetzen, lassen sich wiederum erhöhte Emissionen an NO_x , Flußsäure, CF_4 und C_2F_6 erkennen. Abgesenkt werden die Emissionen von nicht-methanen flüchtigen Kohlenwasserstoffen. Für alle anderen Emissionen in Abbildung 5.15 ergeben sich keine signifikanten Unterschiede.

Der Modellierung der Nutzungsphase wurde ein bestimmter Anteil an Straßenarten und Fahrzuständen zugrunde gelegt. Mangels Daten konnte die Streuung dieser Anteile nicht berücksichtigt werden. Die denkbare Verteilung reicht dabei von beschleunigungsreichen Fahrzuständen im Stadtverkehr bis zu Fahrten mit konstanter Geschwindigkeit. In der Literatur spiegelt sich dies in einer Masseabhängigkeit des Treibstoffverbrauchs von 0,2 bis 1 l/(100 km 100 kg) für Fahrzeuge mit Ottomotoren wieder. In der vorliegenden Studie wurde eine Masseabhängigkeit von 0,48 l/(100 km 100 kg) für ein Mittelklassefahrzeug ermittelt. Die Reproduktion des Literaturspektrums erfordert in etwa die Verdopplung beziehungsweise Halbierung der Angaben für Betrieb und Treibstoffbereitstellung in Abbildung 5.13 und 5.14. Für die übrigen Emissionen läßt sich der Einfluß der Nutzungsphase Abbildung 5.3 entnehmen. Offensichtlich kommt der Wahl dieses Parameters ebenfalls signifikante Bedeutung zu. Für Fahrten mit normalem Anteil an Straßenarten und Fahrzuständen behalten die präsentierten Ergebnisse Gültigkeit.

Vollständiges Anrechnen der sekundären Massenreduktionen auf die Rohkarosserie erhöht die Werte für Betrieb und Treibstoffbereitstellung in Abbildung 5.13 und 5.14 um je etwa ein Drittel. Dies hat keine signifikanten Auswirkungen, die getroffenen Aussagen bleiben erhalten.

Variation des Leichtbaugrades um ± 5 Prozentpunkte führt bei der konventionellen Stahlkarosserie zu einer Schwankungsbreite von $\pm 15\%$ der Beiträge aus Betrieb und Kraftstoffbereitstellung. Im Falle der Stahl-Leichtbaukonstruktion ergibt sich eine entsprechende Variationsbreite von etwa $\pm 1/3$. Auch der Leichtbaugrad stellt damit keine Randbedingung mit signifikanten Auswirkungen dar.

Dies gilt selbst dann noch, wenn sich der Einfluß beider Randbedingungen zu einer 2/3-Erhöhung des Beitrags aus der Nutzungsphase addieren.

5.3 Einfluß von Fahrzeugklasse und Antriebsart

Abbildung 5.16 und 5.17 zeigen die Ergebnisse der Szenarienrechnungen für Rohkarosserien von Pkw der Fahrzeugklasse Kleinwagen und Oberklasse. Im Vergleich mit den Ergebnissen für die Rohkarosserie eines Mittelklasse-Pkw (Abbildung 5.12 bis 5.15) ändert sich innerhalb der Szenarien die Skalierung. Im Fall der Rohkarosserie eines Oberklassefahrzeugs erhöhen sich die Werte um den Faktor

$$\frac{\text{Masse Rohkarosserie Oberklasse}}{\text{Masse Rohkarosserie Mittelklasse}},$$

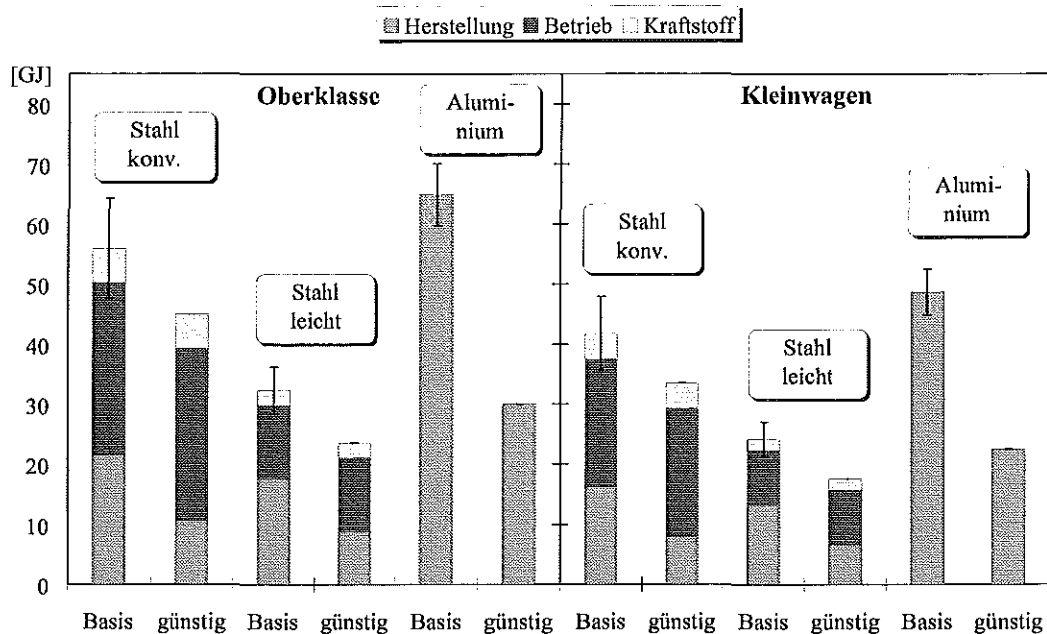


Abbildung 5.16: Primärenergieaufwand über gesamten Lebensweg von Rohkarosserien für Kleinwagen und Oberklasse-Pkw mit Ottomotor. Die Aufwendungen für die Herstellung und die Mehraufwendungen im Betrieb des Fahrzeugs sowie der Kraftstoffbereitstellung sind getrennt ausgewiesen.

im Fall einer Kleinwagen-Rohkarosserie erniedrigen sich die Werte um das Massenverhältnis

$$\frac{\text{Masse Rohkarosserie Kleinwagen}}{\text{Masse Rohkarosserie Mittelklasse}}$$

(siehe auch Anhang E). Damit findet der Vergleich auf anderem Niveau statt, ansonsten bleiben die Schlußfolgerungen jedoch bestehen. Auch hier zeigt das Altschrottreycling signifikanten Einfluß.

Signifikante Vorteile bestehen weiterhin im Bereich der Schwefeldioxidemissionen für die Stahlvariante. Bei den restlichen Emissionen sind tendenziell Vorteile für die Stahlvariante im Bereich der nicht-methanen Kohlenwasserstoffe, des Kohlenmonoxids sowie des Fluor- und Chlorwasserstoffs erkennbar. Die unterschiedlichen Anteile der genutzten Straßenarten führen zu unterschiedlichen Treibstoffeinsparungen durch Leichtbau, wie in Abschnitt 4.2.3 diskutiert. Doch wirkt sich dies nicht signifikant aus, da letztlich zur Treibstoffersparnis der Mittelklasse-Leichtbaukarosserie nur eine Differenz von ca. 10% besteht. Nivellierend wirkt sich auch aus, daß der Leichtbaugrad unabhängig von der Fahrzeugklasse angesetzt wurde. Für die Aluminiumkarosserie wird eine Massenreduktion von 35%, für die Stahl-Leichtbaukonstruktion von 20% zugrunde gelegt. Nimmt man für Kleinwagen eine geringere Massenreduktion an, verschiebt sich das Bild zugunsten der Stahlkarosserie. Analog ändert sich das Ergebnis zugunsten der Aluminiumkarosserie bei höherer

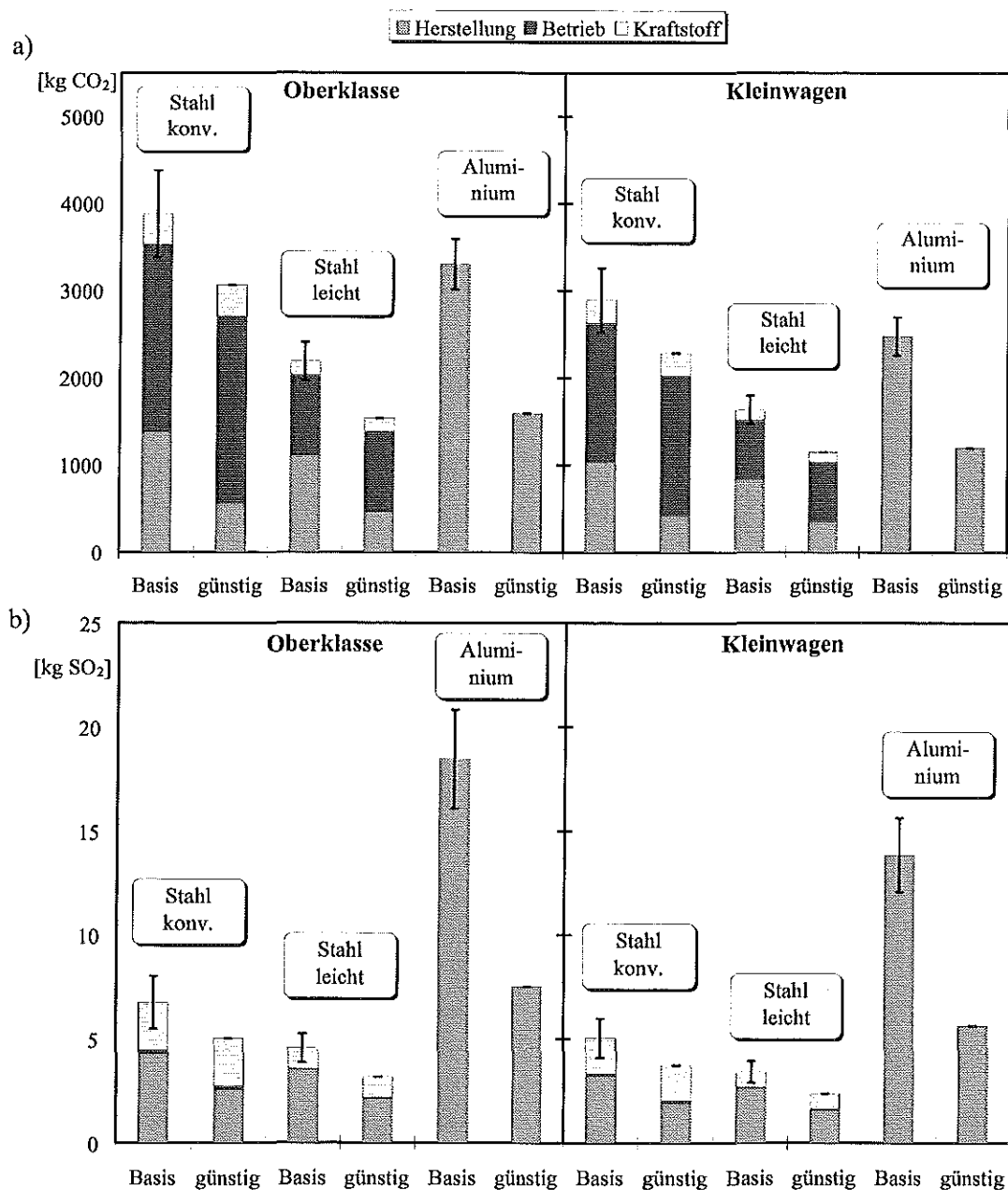


Abbildung 5.17: (a) Kohlendioxid- und (b) Schwefeldioxidemissionen über gesamten Lebensweg einer Rohkarosserie für Kleinwagen und Pkw der Oberklasse. Die Emissionen bei Herstellung und die zusätzlichen Emissionen gegenüber der Aluminiumvariante im Betrieb des Fahrzeugs sowie bei der Kraftstoffbereitstellung sind getrennt ausgewiesen.

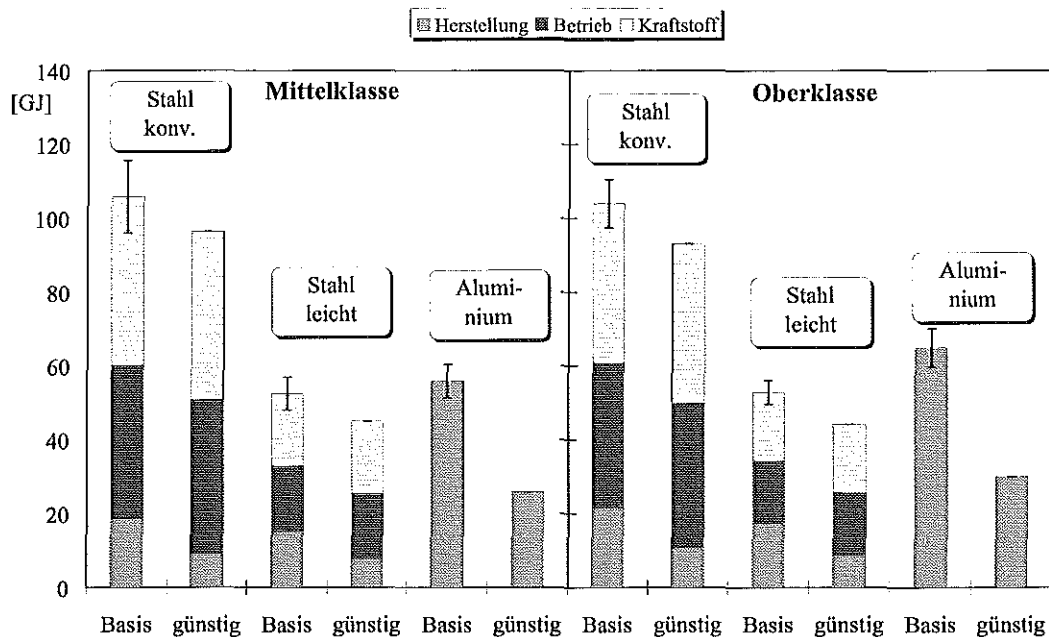


Abbildung 5.18: Primärenergieaufwand über gesamten Lebensweg von Rohkarosserien für Mittelklasse- und Oberklasse-Pkw mit Dieselmotor. Die Aufwendungen für die Herstellung und die Mehraufwendungen im Betrieb des Fahrzeugs sowie der Kraftstoffbereitstellung sind getrennt ausgewiesen.

Massenreduktion in der Oberklasse. Durch die Fahrzeugdaten wird in diesem Projekt eine Klasseneinteilung nach Hubraum und nicht nach Fahrzeugmassen vorgegeben. Der Ansatz eines konstanten Leichtbaugrades erscheint daher angemessen. Die Fahrzeugklasse hat damit auf den Vergleich keinen signifikanten Einfluß.

Die Resultate für Dieselfahrzeuge der Mittel- und Oberklasse finden sich in Abbildung 5.18 bis 5.19. Trotz des höheren Wirkungsgrades der Dieselmotoren und der daraus resultierenden geringeren Masseabhängigkeit des Treibstoffverbrauchs besitzt die Nutzungsphase einen größeren Einfluß, als bei den Pkw mit Ottomotor der Mittel- und Oberklasse. Die Ursachen dafür liegen in der höheren Lebensdauer und Jahresfahrleistung der Pkw mit Dieselmotor. Insgesamt verschiebt sich das Bild zugunsten der Aluminiumkarosserie.

Die für die Pkw mit Ottomotor getroffenen Aussagen bezüglich der Signifikanz der Unterschiede und des Einflusses der verschiedenen Parameter lassen sich auf Pkw mit Dieselmotor übertragen.

Die nicht direkt vom Treibstoffverbrauch beeinflussten Emissionen werden exemplarisch für einen Mittelklasse-Pkw mit Dieselmotor in Abbildung 5.20 dargestellt. Das Resultat ähnelt denen des Fahrzeugs mit Ottomotor. Der signifikante Unterschied im Basisszenario für die Flußsäureemissionen besteht nicht.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß die Masseabhängigkeit des Treibstoffbedarfs sowie die Frage der Altschrottbewertung als Schlüsselparameter auf Basis der hier

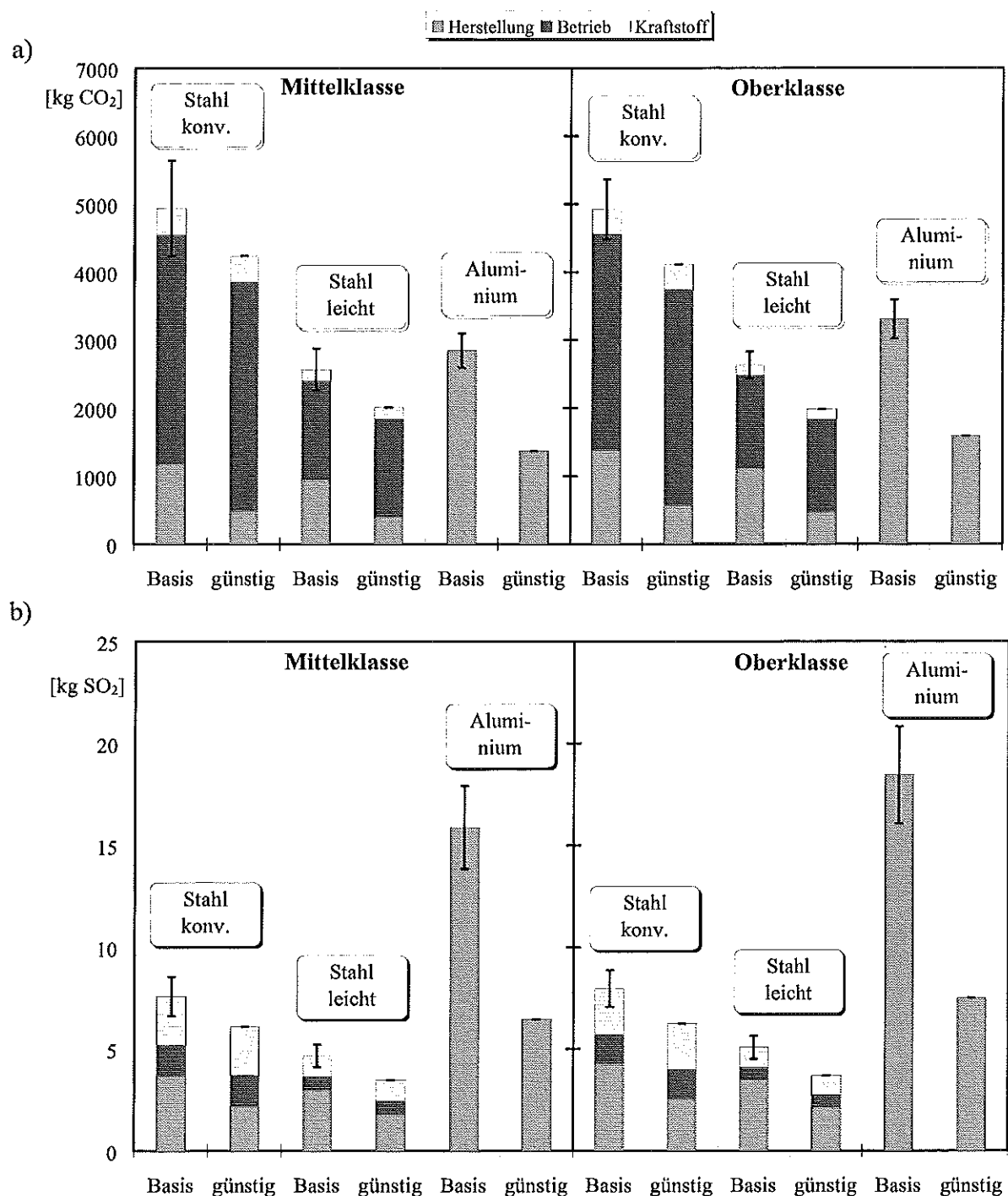


Abbildung 5.19: (a) Kohlendioxid- und (b) Schwefeldioxidemissionen über gesamten Lebensweg von Rohkarosserien für Pkw der Mittel- und Oberklasse mit Dieselmotor. Die Emissionen bei Herstellung und die zusätzlichen Emissionen gegenüber der Aluminiumvariante im Betrieb des Fahrzeugs sowie bei der Kraftstoffbereitstellung sind getrennt ausgewiesen.

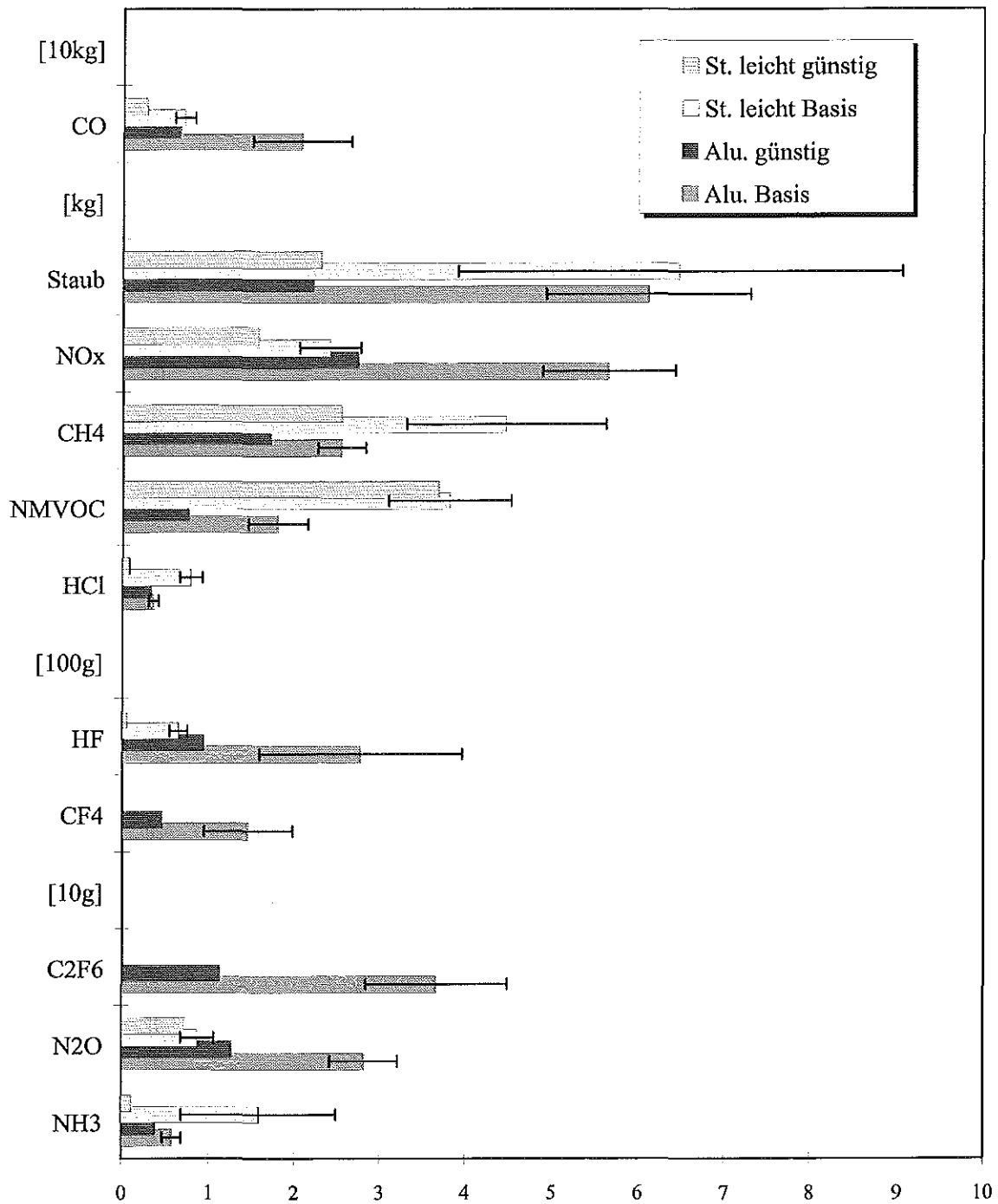


Abbildung 5.20: Von Treibstoffeinsparung im Betrieb nicht direkt beeinflusste Emissionen über gesamten Lebensweg von typischen Rohkarosserien für Pkw der Mittelklasse mit Dieselmotor.

verwendeten Daten in Erscheinung treten. Andere Randbedingungen wirken sich nicht signifikant aus.

5.4 Kovarianzen

Die Bedeutung der Kovarianzen wird im folgenden beispielhaft demonstriert. Als Beispiel im Bereich des Ressourcenverzehr wird die Erzaufbereitung aus der Prozeßkette zur Herstellung der Stahlrohkarosserie betrachtet. Um den Einfluß der Kovarianzen emissionsseitig zu demonstrieren, wird der Bayer-Prozeß aus der Prozeßkette zur Primäraluminiumherstellung betrachtet.

Bei der Erzaufbereitung koppeln der Stoffstrom „Eisenerz“ kovarianz erzeugend, wie ein Vergleich von Abbildung 4.1 (S. 54) und 3.4 (S. 44) zeigt. Tabelle 5.3 läßt sich entnehmen, daß die Möllerzusammensetzung des Hochofens, insbesondere den Anteil an Sinter und Pellets betreffend, starken Schwankungen unterworfen ist.

Der Gesamteintrag M_{Erz} in den Hochofen läßt sich durch Summation über die Erzeinträge durch die Möllerstoffe Stückerz M_{St} , Sinter M_{Si} und Pellets M_{Pe} bestimmen:

$$M_{\text{Erz}} = M_{\text{Si}} + M_{\text{Pe}} + M_{\text{St}}.$$

Tabelle 5.3: Erzeintrag im Hochofen über Stückerz, Sinter und Pellets. Angegeben ist jeweils nur der Erzanteil der Möllerstoffe. Zusätzlich wird der relative Erzanteil von Sinter und Pellets ausgewiesen. Alle Angaben sind in kg/kg Roheisen.

[kg/kg RE]	Stück- erz	Sinter	Pellets	Eisenerz gesamt
$\bar{x}$	0,197	0,749	0,433	1,378
m	0,029	0,093	0,117	0,017
n	7	7	7	7
[10]	0,278	1,037	0,0	1,315
[33]	0,104	0,248	1,032	1,384
[77]	0,200	0,689	0,448	1,337
[127]	0,187	0,787	0,389	1,363
[47]	0,157	0,816	0,464	1,437
[11]	0,319	0,780	0,276	1,376
[62]	0,130	0,887	0,419	1,436

Die Fehlerfortpflanzung liefert:

$$m_{M_{\text{Erz}}}^2 = m_{\text{Si}}^2 + m_{\text{Pe}}^2 + m_{\text{St}}^2 + 2 \frac{s_{\text{Si,Pe}}}{n} + 2 \frac{s_{\text{Si,St}}}{n} + 2 \frac{s_{\text{St,Pe}}}{n}. \quad (5.2)$$

$m_{\text{Si}}, m_{\text{Pe}}, m_{\text{St}}$: Standardabweichung des Mittelwertes des Erzeintrags über Stückerz, Pellets, Sinter,
 $s_{\text{Si,Pe}}, s_{\text{Si,St}}, s_{\text{St,Pe}}$: Kovarianzen.

Ignoriert man die Kovarianzen, so ergibt sich:

$$(1,378 \pm 0,152) \text{ kg Erz/kg RE.}$$

Um die Kovarianzen berücksichtigen zu können, muß die Kovarianzmatrix (s_{xy}) gemäß Gleichung (3.32) aus den Angaben in Tabelle 5.3 berechnet werden:

	St	Si	Pe
St	0	0,010	-0,018
Si	0,010	0	-0,072
Pe	-0,018	-0,072	0

Einsetzen in Gleichung (5.2) ergibt einen Wert von

$$(1,378 \pm 0,017) \text{ kg Erz/kg RE.}$$

Die Standardabweichung des Mittelwertes hat sich damit um eine Größenordnung verkleinert. Alternativ kann auch ein Ersatzprozeß gemäß Abbildung 3.4 konstruiert werden, der die gesamte Erzvorbereitung umfaßt. Nun tritt lediglich der gesamte Erzeintrag als Stoffstrom auf, und man erhält durch Mittelwertbildung den identischen Wert, wie Tabelle 5.3 der Spalte „Eisenerz“ zu entnehmen ist.

Die Bedeutung der Kovarianzen für die Emissionen wird abschließend an einem Prozeß aus der Prozeßkette zur Herstellung einer Aluminiumkarosserie demonstriert. Tabelle 5.4 zeigt den Energiebedarf des Bayer-Prozesses aufgeschlüsselt nach fünf kontinentalen Regionen. Bei dem Prozeß zur Herstellung von kalzinierter Tonerde (Al_2O_3) entstehen keine relevanten prozeßbedingten Emissionen in die Luft. Der Energieeinsatz wird daher mit entsprechenden Modulen der Industrieheizung beziehungsweise Strombereitstellung nach Abschnitt 4.2.5 verbunden.

Abbildung 5.21 zeigt den Vergleich der relativen Standardabweichung des Mittelwertes mit und ohne Berücksichtigung der Kovarianzen. Am Beispiel der CO_2 -Emissionen wird deutlich, daß Kovarianzen bezüglich der Streuung von Emissionswerten nicht a priori vernachlässigt werden dürfen. Für die Schwefeldioxidemissionen läßt sich sogar eine geringfügige Zunahme der relativen Streuung beobachten. Die liegt darin begründet, daß das Erdgas mit sehr kleinem SO_2 -Emissionsfaktor in starkem Maße in Nordamerika sowie in der Region östliches Asien/Ozeanien zum Einsatz kommt. Dadurch polarisieren die Regionen in eine emissionsreiche und eine emissionsarme Gruppe bezüglich des Schwefeldioxids.

Tabelle 5.4: Energiebedarf des Bayer-Prozesses zur Erzeugung kalzinierter Tonerde nach [128]. Alle Angaben beziehen sich auf ein Kilogramm Tonerde.

	Energieträger [MJ/kg]					
	Strom	Steinkohle	Erdgas	Öl S	Öl EL	thermisch
$\bar{x}$	1,60	0,66	2,10	7,70	0,043	10,5
m	0,399	0,718	0,884	1,15	0,026	0,658
s	0,798	1,44	1,77	2,31	0,052	1,32
Afrika/Südasi	0,836	7,06	0,077	7,14	0,052	14,3
Nordamerika	0,63	0,0	11,3	0,445	$6 \cdot 10^{-4}$	11,7
Lateinamerika	0,791	0,442	1,98	9,31	0,118	11,9
Ostasien/Ozeanien	0,572	3,07	6,38	1,47	0,008	10,9
Europa	2,34	0,0	1,32	8,06	0,005	9,39

Diese Information geht bei der Mittelwertbildung verloren. Durch die Kovarianzen bleibt sie erhalten und vergrößert entsprechend die Streumaße.

Wie an diesen Beispielen verdeutlicht, erzeugen austauschbare Prozeßeinträge Kovarianzen. Eine zusammenfassende Größe, wie der Gesamterzeintrag im Hochofen, läßt sich dann in der Regel mit größerer Sicherheit angeben als die Verteilung auf die Einzeleinträge Sinter, Pellets und Stückerz. Austauschbarkeit ist häufig bei Energieträgern gegeben. Der Primärenergieaufwand als aggregierte Maßzahl läßt sich daher im allgemeinen mit größerer Sicherheit bestimmen, als der Bedarf an einzelnen Energieträgern. Allerdings treten bei dieser Größe methodische Probleme, wie die Bewertung regenerativer Energiequellen, hinzu.

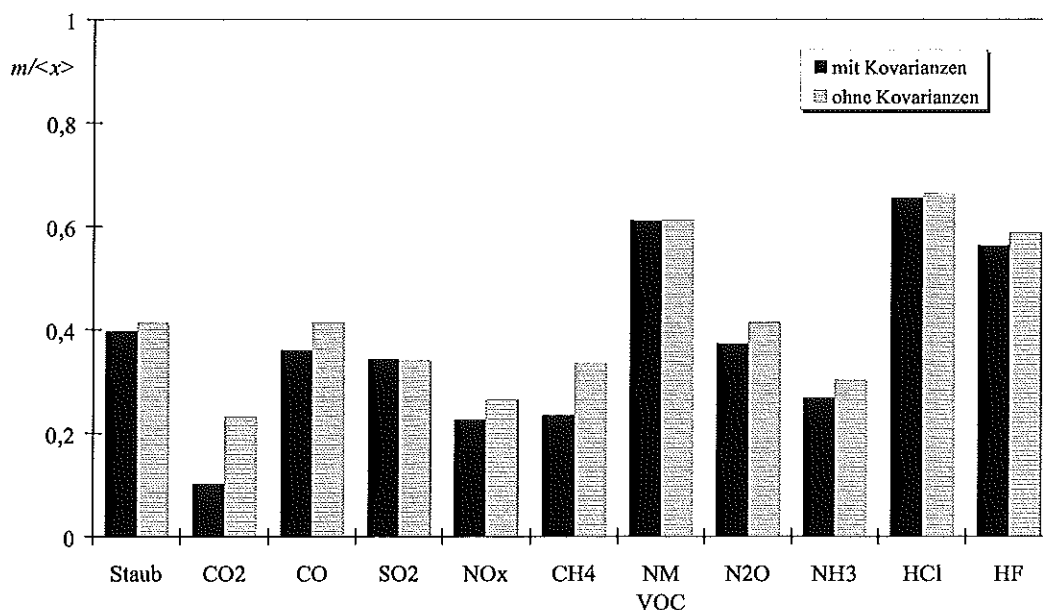


Abbildung 5.21: Relative Standardabweichung des Mittelwertes für Emissionen in die Luft mit und ohne Berücksichtigung der Kovarianzen (Bayer-Prozeß). (m : Standardabweichung des Mittelwertes, $\langle x \rangle$: Mittelwert)

Kapitel 6

Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wird die statistische Fehlerrechnung für die Anwendung in der Sachbilanz adaptiert. Damit wird ein Maß für die Aussagekraft der Ergebnisse in der Sachbilanz unter Berücksichtigung der Ungenauigkeiten der zugrundeliegenden Prozeßdaten gewonnen. Die Standardabweichungen liefern Angaben über die Überlappungen der Streuungsbereiche der Daten und damit ein Maß für die Wahrscheinlichkeit, daß in Einzelfällen Abweichungen von den mittleren Ergebnissen auftreten. Die Standardabweichung des Mittelwertes stellt ein Maß für die Genauigkeit dar, mit der der wahre Mittelwert aus den zugrundeliegenden Daten ermittelt wurde.

Die Methode greift dabei um so genauer, je feiner die Prozeßkette aufgelöst wird, je mehr Daten für den Prozeß zur Verfügung stehen, je besser diese Daten den auftretenden Wertebereich repräsentieren und je kleiner die Datenstreuungen sind. Für große Streuungen liefert das Konzept keine zuverlässigen quantitativen Angaben mehr. Qualitativ läßt sich bei Streuungen im Bereich von 50% oder mehr sagen, daß nur die Größenordnung des Mittelwertes Glaubwürdigkeit besitzt.

Der Rechenaufwand der Fehlerabschätzung ist gering, da lediglich eine Bestimmung der Standardabweichungen und eine Fehlerfortpflanzung innerhalb der in üblicher Weise bereitgestellten Prozeßkette erfolgen muß. Der wesentliche mit der Fehlerabschätzung verknüpfte Aufwand ist durch die Datenerhebung gegeben. Sorgfalt bei der Datenrecherche in Form einer möglichst breiten und aussagekräftigen Datenbasis ist aber grundsätzlich für die Bestimmung einer auf repräsentativen Mittelwerten basierenden Sachbilanz erforderlich. Die Bestimmung von Standardabweichung und Standardabweichung des Mittelwertes stellt dann einen geringen Zusatzaufwand dar.

Die Durchführbarkeit der Methode wird am Beispiel des Vergleichs zwischen Pkw-Rohkarosserien in konventioneller Stahlbauweise, Stahl-Leichtbauweise oder als Aluminium-Blechschalenkonstruktion überprüft. Die Standardabweichung des Mittelwertes erweist sich als geeignetes Maß zur Charakterisierung des Einflusses von Datenunsicherheiten in der nicht herstellerspezifischen Sachbilanzierung. Bei Verzweigungen der Prozeßkette entstehen Korrelationen, die maßgeblichen Einfluß auf die Streuungen von Emissionen und Rohstoffbedarf ausüben können. Dies findet innerhalb des Konzepts in Form der

Kovarianzen in natürlicher Weise Berücksichtigung.

Als maßgebliche Randbedingungen werden die Massenabhängigkeit des Treibstoffbedarfs sowie die Bewertung des Altschrottrecyclings identifiziert.

Der Zusammenhang zwischen Massenreduktion und Treibstoffverbrauch wird wesentlich von Fahrweise, Straßenart und Verkehrsbedingungen bestimmt. Es werden mittlere Fahrzustände zugrunde gelegt.

Eine wesentliche Rolle kommt der Behandlung des Altschrottrecyclings zu. Am Ende des Lebensweges fallen die Rohkarosserien als Altschrott an, der zu Sekundärrohstoffen aufbereitet werden kann. Dieses Sekundärmaterial kann bei derzeitigem Stand der Entsorgung nicht unmittelbar wieder zur Produktion von Karosserieblechen genutzt werden, es kann aber Primärmaterial bei der Herstellung anderer Produkte ersetzen. Die Aufbereitung zu Sekundärrohstoffen ist in den meisten Kategorien mit geringeren Umweltbelastungen verknüpft. Die Substitution von Primärmaterial führt daher zu Umweltentlastungen, die ganz oder teilweise der jeweiligen Rohkarosserie gutgeschrieben werden kann.

Unmittelbar mit dem Treibstoffverbrauch verknüpft sind Primärenergieverbrauch sowie Kohlendioxid- und Schwefeldioxidemissionen. Wird eine Produktion aus Primärwerkstoffen betrachtet, lassen sich im Bereich der SO_2 -Emissionen signifikant niedrigere Werte für die Stahlrohkarosserien aufzeigen. Im Bereich der CO_2 -Emissionen und des Primärenergiebedarfs bestehen nur für die Stahl-Leichtbauversion Vorteile gegenüber der Aluminiumrohkarosserie. Bei vollständiger Gutschrift aus dem Altschrottreycling erweist sich die Aluminiumvariante gegenüber der konventionellen Rohkarosserie im Bereich des Primärenergieaufwands und der CO_2 -Emissionen als überlegen.

Sonstige Emissionen im Betrieb sind nur schwach mit der Fahrzeugmasse korreliert. Sie sind durch eine Leichtbauweise über den verminderten Aufwand zur Treibstoffbereitstellung und die veränderte Prozeßkette der Herstellung beeinflussbar. Im Vergleich der Stahl-Leichtbaukonstruktion und der Aluminiumrohkarosserie lassen sich unabhängig vom Altschrottreycling signifikante günstigere Werte in den Bereichen NO_x , HF, CF_4 und C_2F_6 aufzeigen. Ohne Anrechnung des Altschrottreyclings finden sich weiterhin für die Stahlkonstruktion niedrigere Werte beim N_2O , sowie erhöhte Werte beim HCl. Mit Gutschrift aus dem Altschrottreycling weist die Aluminiumvariante zusätzlich günstigere Werte für die NMVOC-Emissionen auf.

In der vorliegenden Arbeit wird aufgezeigt, daß mittels statistischer Fehlerabschätzung Datenstreuungen hinreichend differenziert behandelt werden können um Signifikanzen zu identifizieren. In Kombination mit Szenarienrechnungen lassen sich auch systematische Einflüsse, wie beispielsweise Allokationsfragen, erfassen. Auf diese Weise lassen sich signifikante Effekte herausarbeiten und die entscheidenden Randbedingungen pointiert aufzeigen. Die Berücksichtigung von Kovarianzen erlaubt der komplexen Vernetzung der Prozeßkette widerspruchsfrei Rechnung zu tragen. Die Ansprüche an die Datenqualität erscheinen im Bereich gängiger, gut untersuchter Werkstoffe erfüllbar. Die Zuverlässigkeit der Streuungsmaße wird mit zunehmender Datenfülle ansteigen. Insgesamt stellt die statistische Fehlerabschätzung ein nützliches und angemessenes Instrument dar, um die Aussagekraft von Sachbilanzen einzuschätzen.

Anhang A

Fahrzeugklassen

Für die Einteilung nach Fahrzeugklassen gemäß

Ottomotor:	$\leq 1500 \text{ cm}^3$	Kleinwagen
	$1500 \dots 2000 \text{ cm}^3$	Mittelklasse
	$> 2000 \text{ cm}^3$	Oberklasse
Dieselmotor	$< 2000 \text{ cm}^3$	Mittelklasse
	$> 2000 \text{ cm}^3$	Oberklasse

werden aus [36] die mittleren Leergewichte, Motorleistungen, und Hubräume der Fahrzeuge bestimmt, die in die Auswertung zur Nutzungsphase eingehen. Tabelle A.1 zeigt die so erhaltenen Resultate. Der Zusammenhang zwischen Leergewicht und Masse der Rohkarosserie läßt sich Tabelle A.2 entnehmen.

Tabelle A.1: Mittlere charakteristische Werte der jeweiligen Fahrzeugklassen.

Klasse		Ottomotor	Diesel
klein	M [kg]	950	–
	P [kW]	45	–
	H [ccm]	1300	–
mittel	M [kg]	1200	1150
	P [kW]	85	55
	H [ccm]	1850	1775
ober	M [kg]	1500	1475
	P [kW]	145	90
	H [ccm]	2800	2550

Tabelle A.2: Leergewichte und Rohkarosseriemassen verschiedener Pkw.

Leergewicht [kg]	Masse Rohkarosserie [kg]	Anteil [%]	Quelle
950	265	28	[37]
1025	300	29	[38]
1070	280	26	[39]
1750	392	22	[40]
1900	430	23	[41]

Eine lineare Regression zu diesen Werten ergibt:

$$M_{\text{RK}} = 0,16 \cdot M_{\text{leer}} + 118\text{kg}$$

mit

$$r^2 = 0,97,¹$$

M_{RK} : Masse Rohkarosserie,
 M_{leer} : Leergewicht.

Für die mittleren Fahrzeugmassen lassen sich damit die in Tabelle A.3 gezeigten Werte abschätzen.

Es wird davon ausgegangen, daß die Rohkarosserie bei Pkw mit Dieselmotoren einen vergleichbaren Massenanteil am Leergewicht haben, wie dies bei Pkw mit Ottomotor der Fall ist. Da sich die Rohkarosserien in der Mittel- und Oberklasse für beide Antriebsarten nur geringfügig unterscheiden, wird jeweils die Rohkarosseriemasse der Fahrzeuge mit Ottomotor eingesetzt.

Tabelle A.3: Rohkarosseriemasse in den Fahrzeugklassen.

Antriebsart	Klasse	mittleres Leergewicht [kg]	Masse Rohkarosserie [kg]
Otto	klein	950	270
	mittel	1200	310
	ober	1500	360
Diesel	mittel	1150	300
	ober	1475	355

¹Erläuterungen zum Korrelationskoeffizienten r^2 finden sich in Abschnitt 4.2.3.

Anhang B

Demonstration der Methode

An einer stark vereinfachten Prozeßkette wird eine Beispielrechnung durchgeführt, in Anlehnung an die in Abschnitt 3.2.6 (S. 50) gegebene Erläuterung der Vorgehensweise. Betrachtet wird die Herstellung von Primäraluminium. Die Prozeßkette wird zu den drei Prozessen „Bauxitabbau“, „Bayer-Prozeß“ und „Schmelzflußelektrolyse“ zusammengefaßt. Die Herstellung von Betriebs- und Hilfsstoffen wird nicht betrachtet. Ziel ist die Bestimmung des Primärenergieaufwandes zur Erzeugung eines Kilogramms Aluminiums. Erläuterungen zu den Prozessen finden sich in Abschnitt 4.2.2.

1. Die Mittelwertbildung wird am Beispiel des Bedarfs an elektrischer Energie im Bayer-Prozeß demonstriert. Es handelt sich um eine gewichtete Mittelung. Die Übertragung auf den Fall ungewichteter Werte mittels der korrespondierenden Formeln in Abschnitt 3.2.6 ist offensichtlich. Tabelle B.1 weist den Energiebedarf innerhalb verschiedener globaler Regionen und als Wichtung deren Anteil am westeuropäischen Markt nach Tabelle C.58 aus. Der Mittelwert berechnet sich nun nach der im Abschnitt 3.2.6 angegebenen Formel:

$$\begin{aligned}\overline{E}_{el} &= \frac{\sum_{i=1}^n g_i E_{el,i}}{\sum_{i=1}^n g_i} \\ &= \frac{0,03 \cdot 0,836 + 0,01 \cdot 0,630 + 0,32 \cdot 0,791}{0,03 + 0,01 + 0,32 + 0,10 + 0,54} \text{ MJ} \\ &\quad + \frac{0,10 \cdot 0,572 + 0,54 \cdot 2,338}{0,03 + 0,01 + 0,32 + 0,10 + 0,54} \text{ MJ} \\ &= \frac{1,604}{1} \text{ MJ} = 1,604 \text{ MJ} \\ \text{analog: } \overline{E}_{th} &= 10,501 \text{ MJ}\end{aligned}$$

Mit Abschluß des ersten Schrittes sind die Stoff- und Energieströme der einzelnen Prozesse durch Mittelwerte charakterisiert. Noch sind die Datenstreuungen nicht erfaßt, wie in Abbildung B.1a durch die schmalen Pfeile angedeutet.

Tabelle B.1: Energiebedarf und dessen Wichtung für den west-europäischen Markt bei der Tonerdeherstellung im Bayer-Prozeß (vollständige Angaben in Tabelle C.58). Die Daten beziehen sich auf 1 kg Tonerde.

Tonerdeherstellung im Bayer-Prozeß					
Wichtung	0.03	0.01	0.32	0.10	0.54
E_{el} [MJ]*	0.836	0.630	0.791	0.572	2.338
E_{th} [MJ]*	14.333	11.697	11.853	10.928	9.385
*Quelle: IPAI [128]					

2. In diesem zweiten Schritt werden nun die Streuung der einzelnen Angaben in Form der Standardabweichung oder der Standardabweichung des Mittelwertes erfaßt. In diesem Beispiel wird zur Vereinfachung nur die Standardabweichung des Mittelwertes betrachtet. Die Berechnung erfolgt wiederum nach den in Abschnitt 3.2.6 angegebenen Formeln, unter Ausnutzung von $\sum_i^n g_i = 1$ (siehe Punkt 1):

$$\begin{aligned}
 m_{E,el}^2 &= \frac{\sum_{i=1}^n g_i (x_i - \bar{x})^2}{(n-1) \sum_{i=1}^n g_i} \\
 &= \frac{0,03 \cdot (0,836 - 1,604)^2 + 0,01 \cdot (0,630 - 1,604)^2}{(5-1) \cdot 1} \text{ MJ}^2 \\
 &\quad + \frac{0,32 \cdot (0,791 - 1,604)^2 + 0,10 \cdot (0,572 - 1,604)^2}{(5-1) \cdot 1} \text{ MJ}^2 \\
 &\quad + \frac{0,54 \cdot (2,338 - 1,604)^2}{(5-1) \cdot 1} \text{ MJ}^2 \\
 &= 0,159 \text{ MJ}^2 \\
 \Rightarrow m_{E,el} &= \sqrt{0,159} = 0,399 \text{ MJ} \\
 \text{analog: } m_{E,th} &= 1,315 \text{ MJ}
 \end{aligned}$$

Die Stoffströme werden nun durch ihren Mittelwert und ihre Standardabweichung des Mittelwertes charakterisiert. Damit ist der Mittelwert und dessen Streuung erfaßt. Dies wird in Abbildung B.1b durch die aufgeweiteten Pfeile um die Mittelwerte herum symbolisiert. Die Bestimmung der Primärenergie erfordert die Berechnung der Kovarianz zwischen thermischen und elektrischem Energiebedarf da sich diese Ströme vom funktionellen Fluß „Energie“ aus verzweigen und sich in Form der Primärenergie wiedervereinigen (siehe Abschnitt 3.2.4, S. 44).

$$s_{el,th} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n g_i} \sum_{i=1}^n g_i (E_{el,i} - \bar{E}_{el})(E_{th,i} - \bar{E}_{th})$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{0,03 \cdot (0,836 - 1,604)(14,333 - 10,501)}{(5 - 1) \cdot 1} \text{MJ}^2 \\
&\quad + \frac{0,01 \cdot (0,630 - 1,604)(11,697 - 10,501)}{(5 - 1) \cdot 1} \text{MJ}^2 \\
&\quad + \frac{0,32 \cdot (0,791 - 1,604)(11,853 - 10,501)}{(5 - 1) \cdot 1} \text{MJ}^2 \\
&\quad + \frac{0,10 \cdot (0,572 - 1,604)(10,928 - 10,501)}{(5 - 1) \cdot 1} \text{MJ}^2 \\
&\quad + \frac{0,54 \cdot (2,338 - 1,604)(9,385 - 10,501)}{(5 - 1) \cdot 1} \text{MJ}^2 \\
&= \frac{-0,938}{4} \text{MJ}^2 = -0,234 \text{MJ}^2
\end{aligned}$$

Für den Bauxitabbau und die Elektrolyse liegen nicht genügend vollständige Datensätze vor, um Kovarianzen sinnvoll zu berechnen. Hier muß daher die Näherung $s_{el,th} \approx 0$ zugrunde gelegt werden.

3. Der dritte Schritt dient dazu die Emissionen auf den ausgewiesenen thermischen Energiebedarf zu skalieren. Dieser Schritt trägt den Eigenarten der Fallstudie Rechnung und ist nicht von grundsätzlicher Bedeutung für die statistische Fehlerabschätzung in der Sachbilanzierung und wird hier nicht weiter diskutiert.
4. Im Rahmen dieses Beispiels wird anstelle der Emissionen der Primärenergiebedarf der Prozesse als vierter Schritt berechnet. Dies geschieht durch Multiplikation des Energiebedarfs mit dem Kehrwert des entsprechenden Bereitstellungsnutzungsgrades (g_{th} bzw. g_{el} , Erläuterungen zu diesem Konzept finden sich u.a. in [114]). Zur Vereinfachungen wird angenommen, daß die Bereitstellungsnutzungsgrade keiner Streuung unterliegen, also

$$m_{g,th} = m_{g,el} = m_{1/g,th} = m_{1/g,el} = 0.$$

Im folgenden wird mit den Bereitstellungsnutzungsgraden $g_{th} = 0,915$ und $g_{el} = 0,36$ gerechnet, die [63] entnommen werden. In Analogie zu den in Abschnitt 3.2.6 angegebenen Formeln ergibt sich mit diesen Werten:

$$\begin{aligned}
\overline{PE} &= \frac{1}{g_{th}} \overline{E}_{th} + \frac{1}{g_{el}} \overline{E}_{el} \\
&= \left(\frac{10,501}{0,915} + \frac{1,604}{0,360} \right) = 15,932 \\
\Rightarrow m_{PE}^2 &= \sum_{i=th,el} \left(\overline{E}_i^2 m_{1/g,i}^2 + \frac{1}{g_i^2} m_{E,i}^2 \right) + \sum_{i=th,el} \sum_{j=th,el} \frac{1}{g_i g_j} \frac{s_{E_i E_j}}{n} \\
&= \frac{1}{g_{th}^2} m_{E,th}^2 + \frac{1}{g_{el}^2} m_{E,el}^2 + 2 \frac{1}{g_{th} g_{el}} \frac{s_{E_{th} E_{el}}}{2}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \left(\frac{1,315^2}{0,915^2} + \frac{0,399^2}{0,360^2} + \frac{-0,234}{0,915 \cdot 0,360} \right) \text{MJ}^2 \\
&= 3,128 \text{MJ}^2
\end{aligned}$$

$$\Rightarrow m_{PE} = 1,768 \text{MJ}$$

Tabelle B.2 gibt einen Überblick über den Endenergiebedarf und den daraus berechneten Primärenergiebedarf aller drei Prozesse.

Tabelle B.2: Endenergiebedarf und Primärenergiebedarf bezogen auf jeweils 1 kg Prozeßprodukt. Der angegebene Fehler gibt die einfache Standardabweichung des Mittelwertes wieder.

End- und Primärenergiebedarf			
Prozeß	E_{el} [MJ]	E_{th} [MJ]	PE [MJ]
Bauxitabbau	$0,0072 \pm 0,0036$	$0,614 \pm 0,122$	$0,691 \pm 0,134$
Bayer	$1,604 \pm 0,399$	$10,501 \pm 1,315$	$15,932 \pm 1,786$
Elektrolyse	$54,002 \pm 0,454$	$19,832 \pm 0,271$	$171,680 \pm 1,295$

- Die mittlere Gewichtung (Mengenmultiplikator) der Prozesse $\bar{g}_i$ wird auf konventionelle Weise berechnet mittels einer der im Abschnitt 2.2 diskutierten Algorithmen. Dieser Punkt wird von der statistischen Fehlerabschätzung nicht unmittelbar tangiert und hier nicht weiter diskutiert sondern in die Beispielrechnung unter Punkt 6 einbezogen.
- Um die Standardabweichung des Mittelwertes der Prozeßwichtungen zu berechnen wird die Fehlerfortpflanzung von dem Referenzfluß der funktionellen Einheit ausgehend sukzessive angewandt. Da im Rahmen dieser Beispielrechnung ein Vergleich nicht sinnvoll durchgeführt werden kann, wurde auch keine funktionelle Einheit festgelegt. Als Bezugsgröße dient in dieser Betrachtung ein Kilogramm Aluminium. Ersatzweise wird von dieser Größe ausgegangen. Die für die Prozeßwichtung relevanten Stoffflüsse sind in Abbildung B.1 benannt, in Tabelle B.3 quantisiert. Als Wichtungsfaktor ergibt sich für die Schmelzflußelektrolyse 1 ± 0 und für den Bayer-Prozeß $1,91 \pm 0,004$. Der Mengenmultiplikator für den Bauxitabbau muß gemäß den Formeln aus Abschnitt 3.2.6 berechnet werden:

$$\begin{aligned}
g_{Bayer} &= 1,910 \cdot 2,152 = 4,110 \\
m_{g,Bayer}^2 &= \bar{g}_i^2 m_{x_i}^2 + \bar{x}_i^2 m_{g_i}^2 \\
&= 1,910^2 \cdot 0,061^2 + 2,152^2 \cdot 0,004^2 = 0,014 \\
\Rightarrow m_{g,Bayer} &= 0,117
\end{aligned}$$

Tabelle B.3: Für die Prozeßwichtung relevante Stoffflüsse, bezogen auf jeweils 1 kg Prozeßprodukt.

[kg]	Bauxitabbau	Bayer-Prozeß	Schmelzflußelektrolyse
Bauxit	1 ± 0	$2,152 \pm 0,061$	0
Tonerde	0	1 ± 0	$1,91 \pm 0,004$
Aluminium	0	0	1 ± 0

7. In diesem Schritt werden die Stoff- und Energieflüsse der Prozesse mit dem Wichtungsfaktor multipliziert. Dies wird hier beispielhaft für den Primärenergiebedarf im Bauxitabbau durchgeführt:

$$\begin{aligned}\overline{PE}_g &= g_{\text{Bauxitabbau}} PE \\ &= (4,110 \cdot 0,691) \text{ MJ} = 2,840 \text{ MJ}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}m_{PE,g}^2 &= \overline{g}_j^2 m_{PE}^2 + \overline{PE}_i^2 m_{g,\text{Bauxitabbau}}^2 \\ &= (4,110^2 \cdot 0,134^2 + 0,691^2 \cdot 0,177^2) \text{ MJ}^2 = 0,318 \text{ MJ}^2 \\ \Rightarrow m_{PE,g} &= 0,564 \text{ MJ}\end{aligned}$$

Für die betrachteten Prozesse ergibt sich auf diese Weise für den Primärenergiebedarf:

$$\begin{aligned}\text{Bauxitabbau:} & \quad (2,840 \pm 0,564) \text{ MJ}, \\ \text{Bayer-Prozeß:} & \quad (30,430 \pm 3,377) \text{ MJ}, \\ \text{Elektrolyse:} & \quad (171,680 \pm 1,295) \text{ MJ}.\end{aligned}$$

8. Auf die Einbeziehung von Teilprozeßketten wird zugunsten der Anschaulichkeit verzichtet.
9. Abschließend wird über die Beiträge der Prozesse summiert. Für den gesamten Primärenergiebedarf ergibt sich:

$$\begin{aligned}PE_{tot} &= (2,840 + 30,430 + 171,680) \text{ MJ} = 204,950 \text{ MJ} \\ m_{PE,tot}^2 &= (0,564^2 + 3,377^2 + 1,295^2) \text{ MJ}^2 = 13,399 \text{ MJ}^2 \\ \Rightarrow m_{PE,tot} &= 3,660 \text{ MJ}\end{aligned}$$

$$\Rightarrow PE_{tot} = (205,0 \pm 3,7) \text{ MJ}.$$

Es sei noch einmal betont, daß die Berechnung ausschließlich Demonstrationszwecken dient und keineswegs eine realistische Einschätzung des Primärenergiebedarfs bei der Erzeugung von 1 kg Aluminium liefern soll. Die Problematik der Berechnung des kumulierten Energieaufwandes in diesem Fall wird in Abschnitt 4.2.5 (S. 97) diskutiert.

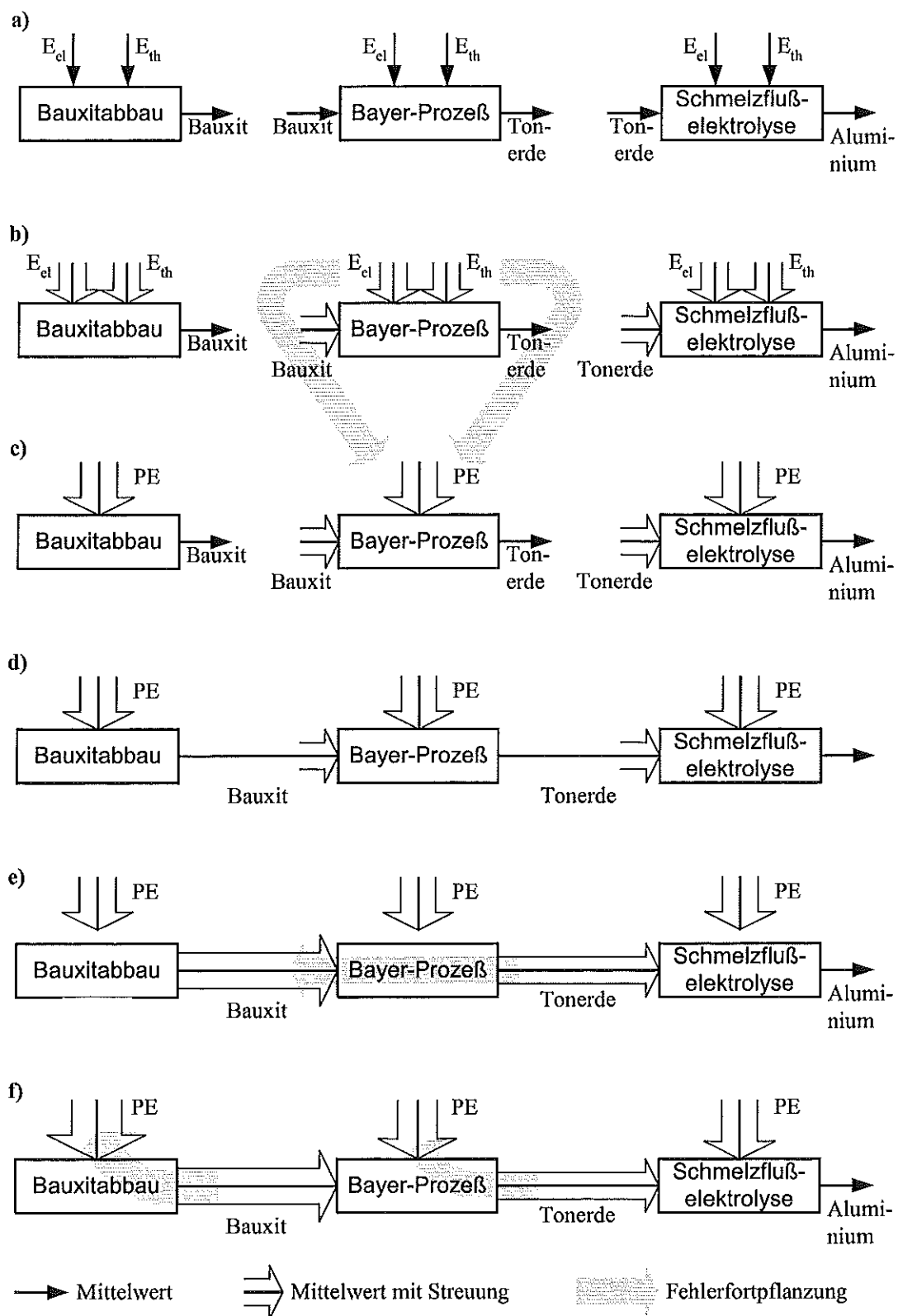


Abbildung B.1: Veranschaulichung der Fehlerabschätzung bei der Prozeßkettenanalyse.

Anhang C

Einzelprozesse

In diesem Abschnitt werden die verwendeten Daten der Einzelprozesse dokumentiert und erforderlichenfalls erläutert.¹ Neben den Einzelwerten finden sich auch Mittelwerte $\langle x \rangle$, Streuungsmaß s , Standardabweichung des Mittelwertes m , Datenumfang n sowie Kovarianzmatrizen und Angaben zur Massenerhaltung. In den Tabellen der Abschnitte C.1 und C.2 sind keine Allokationen oder Skalierungen enthalten.

Als wichtige Testgrößen der Angaben zu den Einzelprozessen stehen die Gesetze der Energie- und Massenerhaltung² zur Verfügung. Bei den hier erhobenen Daten fehlten in der Regel notwendige Angaben zur Berechnung von Abwärme und stofflich gebundenen Enthalpien. Daher wurden die Mittelwerte der Einzelprozesse auf Massenerhaltung überprüft. Dazu wurden neben berechneter Verbrennungsluft und -abgas auch Größen berücksichtigt, die nicht in die Sachbilanz Eingang finden. Da die meisten verwendeten Datensätze unvollständig sind, kann die Massenerhaltung im Mittel nicht exakt gewährleistet werden. Im Rahmen der Standardabweichung des Mittelwertes sollte jedoch die Gesamtmasse der Eingänge und Ausgänge übereinstimmen. Diese Bedingung wird von allen Einzelprozessen erfüllt, wie in den Abschnitten C.1 und C.2 aufgezeigt wird. Lediglich bei den Teilprozeßketten „Tonerdeherstellung“ und „Primäraluminiumherstellung“ sind die Angaben der Quelle so stark aggregiert, daß eine sinnvolle Prüfung der Massenbilanz nicht oder nur eingeschränkt möglich ist. Die Teilprozeßketten werden berücksichtigt, da ihnen mit [11] eine vertrauenswürdige Quelle zugrunde liegt.

Energieträger, deren Verbrennungsemissionen bereits in den Tabellen als prozeßspezifisch erfaßt sind, sind mit „(p)“ gekennzeichnet. Mit „(n)“ markierte Werte sind bereits über andere Quellen erfaßt, stellen grobe Schätzungen dar oder wurden als unglaubwürdig eingestuft und werden nicht berücksichtigt. Andere Gründe für die Außerachtlassung von Daten werden bei den jeweiligen Tabellen erläutert. Handelt es sich um einen mit „(u)“ gekennzeichneten Energieträgerbedarf, so sind die Angaben nicht vollständig und erlauben keine Berechnung der Kovarianzen. Diese Werte werden nicht direkt zur Berechnung

¹Die Teilprozeßkette „Stahlblecherzeugung“ findet keinen Eingang in die Analyse. Die Systemgrenzen lassen die Szenarienrechnungen in Kapitel 5 nicht zu. Die Teilprozeßkette wird dokumentiert, da sie Bestandteil der in diesem Projekt erhobenen Datenbank ist.

²Auftretende Verletzungen bei der Kernspaltung sind von vernachlässigbarer Größe.

Tabelle C.1: Literaturschlüssel der verzeichneten Datenquellen in den folgenden Tabellen der Anhänge C.1 und C.2.

Quelle	Literatur	Quelle	Literatur
Aichinger	[52]	Mauch	[147]
AI-Taschenbuch	[124]	Merten	[77]
Behr	[135]	Mjaset	[148]
Bogdandy	[136]	Murray	[149]
Busmann	[137]	Pawlek	[115]
Cappel	[138]	Penkuhn	[150]
Corinair 91	[104]	Philipp	[31]
Degner	[139]	Philipp 96	[151]
DGMK	[81]	RAG 1992	[152]
Eyerer	[55]	Rentz 90	[153]
Franze	[40]	Reynolds	[154]
Frischknecht	[33]	Rohn	[60]
GDA	[140]	Rösener	[46]
Gemis 2.1	[118]	Sandberg	[155]
Gemis 3.0	[62]	Schaefer	[63]
Habersatter	[10]	Schucht	[156]
Hamm	[141]	Schweimer	[38, 157]
IFE/FFE	[39]	Spittel	[158]
ISI	[57]	SRU 250	[11]
IKARUS	[35]	UBA 5/96	[49]
IPAI	[128]	UBA89 DS86	[100] ²⁾
Jahrbuch 89/93	[47] ¹⁾	UBA DS95	[100] ³⁾
Knop	[142]	UBA89 BAT	[100] ⁴⁾
Krumm	[143]	Wagner	[123]
Kugeler	[144]	Weber	[159]
LNRW 1993	[145]	Wilps	[44]
Lüngen 91	[146]	Ziegenbalg	[160]
Lüngen 95	[127]	Ziegler	[161]
¹⁾ Angaben für 1989 bzw. 1993 ausgewertet			
²⁾ Angaben für 1986 ³⁾ Angaben für 1989			
⁴⁾ Angaben zur Best Available Technologie 1989			

von Emissionen herangezogen. Sie tragen aber zum thermischen Energiebedarf bei, auf den die Emissionen skaliert werden (siehe Abschnitt 3.2.5). Unter dem thermischen Energiebedarf (in den Tabellen mit „therm“ bezeichnet) wird die Summe nichtelektrischer Energieeinträge verstanden. Die Kürzel „Öl S“ und „Öl EL“ stehen für die Energieträger schweres bzw. extra leichtflüssiges Heizöl. Berechnete Werte werden mit „(b)“ markiert. In der Tabelle C.1 findet sich der Literaturschlüssel der in den Tabellen aufgeführten Quellenbezeichnungen.

C.1 Stahlrohkarosserie

Tabelle C.2: Prozeßspezifische Daten für den Einzelprozeß Eisenerzförderung. Die Angaben beziehen sich auf 1 kg Eisenerz.

	Wichtung für Roherzbedarf Förderländer									6,50E-02 S	6,50E-02 S
	<x>	m	s	n	Habersatter	Friskhnecht	Merten	SRU 250	Sandberg		
Energieträger	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg		MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg
Strom int. ¹⁾	1,50E-01	5,67E-02	1,50E-01	7	1,11E-01	4,90E-01	9,72E-02	8,64E-02	(u) 9,00E-02	(u) 9,00E-02	(u) 8,64E-02
Diesel (p)	6,11E-02	1,72E-02	3,44E-02	4	3,46E-02	1,10E-01	6,00E-02	4,00E-02	-	-	-
thermisch	6,11E-02	1,72E-02	3,44E-02	4	3,46E-02	1,10E-01	6,00E-02	4,00E-02	-	-	-
Materialbedarf	kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg
Eisenerz	-1,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1	-	-	-	-	-	-	-
Roherz ²⁾	2,36E+00	3,35E-01	8,86E-01	8	-	-	-	(n) 1,61E+00	-	1,47E+00	1,40E+00
Em. in Luft	kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg
C2F6	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-
CF4	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-
CH4	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-
CO	9,00E-05	4,50E-05	4,50E-05	1	-	-	-	9,00E-05	-	-	-
CO2	4,48E-03	1,28E-03	2,57E-03	4	(b) 2,55E-03	(b) 8,12E-03	(b) 4,43E-03	2,81E-03	-	-	-
HCl	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-
HF	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-
N2O	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-
NH3	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-
NMVOC	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-
NOx	3,42E-04	1,71E-04	1,71E-04	1	-	-	-	3,42E-04	-	-	-
SO2	2,05E-05	1,42E-05	2,85E-05	4	(b) 3,20E-06	(b) 1,02E-05	(b) 5,55E-06	6,30E-05	-	-	-
Staub	3,09E-03	2,91E-03	4,12E-03	2	6,00E-03	-	-	1,71E-04	-	-	-
	kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg
Abraum	1,36E+00	3,35E-01	8,86E-01	8	-	-	(n) 1,38E+00	(n) 6,10E-01	-	4,75E-01	4,02E-01
Materialbedarf	Wichtung für Roherzbedarf Förderländer				1,40E-01 AUS	2,50E-01 BR	1,50E-01 CDN	2,50E-01 BRA	4,00E-02 Liberia	4,00E-02 USA	
					Wilps / Rösener						
					kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	
Roherz ²⁾					1,70E+00	1,90E+00	2,60E+00	1,70E+00	4,60E+00	5,20E+00	

¹⁾ Teilweise außereuropäische Bereitstellung, hier verknüpft mit Modul UCPTE.

²⁾ Wichtung für deutsche Importverhältnisse.

¹⁾ Teilweise außereuropäische Bereitstellung, hier verknüpft mit Modul UCPTB.

²⁾ Wichtung für deutsche Importverhältnisse.

Tabelle C.3: Kovarianzen der Energieträger bei der Eisenerzförderung.

s_{xy}/n	Strom int.	Diesel
Strom int.	0,00E+00	1,59E-03
Diesel	1,59E-03	0,00E+00

Tabelle C.4: Massenbilanz für den Einzelprozeß Eisenerzförderung.

Eingang [kg]	<x>	m
Energieträger	1,43E-03	4,02E-04
Luft ¹⁾	(b) 1,93E-02	(b) 5,41E-03
Material	2,36E+00	3,35E-01
Σ	2,38E+00	3,35E-01
Ausgang [kg]	<x>	m
Produkt	1,00E+00	0,00E+00
Abgas ²⁾	(b) 2,02E-02	(b) 5,77E-03
Abraum	1,36E+00	3,35E-01
Σ	2,38E+00	3,35E-01

¹⁾ stöchiometrisch aus Energieträgerbedarf

²⁾ stöchiometrisch aus CO₂-Emissionen

Tabelle C.5: Prozeßspezifische Daten für den Einzelprozeß Eisenerz-pelletierung. Die Angaben beziehen sich auf 1 kg Eisenerzpellets.

	<x>	m	s	n	Frisknecht	Merten	Habersatter	Cappel	Knop
Energieträger	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg		MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg
Strom int. ¹⁾	1,26E-01	1,93E-02	6,41E-02	11	2,20E-02	1,68E-01	-	(u) 8,28E-02	(u) 1,44E-01
Steinkohle	1,39E-01	9,27E-02	2,93E-01	10	0,00E+00	6,59E-01	(u) 0,00E+00	-	-
Erdgas	1,84E-01	1,16E-01	3,66E-01	10	3,25E-01	0,00E+00	(u) 3,78E-01	-	-
Öl S	3,22E-01	1,47E-01	4,64E-01	10	0,00E+00	0,00E+00	(u) 7,14E-02	-	-
Öl EL	2,56E-02	2,56E-02	8,10E-02	10	2,56E-01	0,00E+00	(u) 0,00E+00	-	-
thermisch	7,44E-01	1,45E-01	5,04E-01	12	5,81E-01	6,59E-01	4,49E-01	3,35E-01	1,88E+00
Materialbedarf	kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg
Bentonit	1,01E-02	5,28E-03	1,06E-02	4	8,00E-03	2,50E-02	-	-	-
Brantkalk	1,60E-02	8,00E-03	8,00E-03	1	-	-	-	-	-
Eisenerz ²⁾	(n) 1,00E+00	(n) 6,43E-03	(n) 1,11E-02	3	9,92E-01	1,01E+00	-	-	-
Pellets	-1,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1	-	-	-	-	-
Kalkstein ²⁾	(n) 1,32E-02	(n) 7,18E-03	(n) 1,61E-02	5	0,00E+00	0,00E+00	-	-	-
Luft	3,02E-01	1,51E-01	1,51E-01	1	-	3,02E-01	-	-	-
Em. in Luft	kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg
Abluft	3,05E-01	1,53E-01	1,53E-01	1	-	3,05E-01	-	-	-
C2F6	-	-	-	0	-	-	-	-	-
CF4	-	-	-	0	-	-	-	-	-
CH4	-	-	-	0	-	-	-	-	-
CO	-	-	-	0	-	-	-	-	-
CO2	-	-	-	0	-	-	-	-	-
HCl	-	-	-	0	-	-	-	-	-
HF	-	-	-	0	-	-	-	-	-
N2O	-	-	-	0	-	-	-	-	-
NH3	-	-	-	0	-	-	-	-	-
NMVOC	-	-	-	0	-	-	-	-	-
NOx	-	-	-	0	-	-	-	-	-
SO2	-	-	-	0	-	-	-	-	-
Staub	7,67E-04	3,84E-04	3,84E-04	1	-	-	-	-	-
					Sandberg		Murray		SRU 250
Energieträger					MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg
Strom int.					1,58E-01	1,80E-01	1,87E-01	1,47E-01	1,73E-01
Steinkohle					0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Erdgas					0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Öl S					2,90E-01	3,40E-01	1,80E-01	1,18E+00	1,16E+00
Öl EL					0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
thermisch					2,90E-01	3,40E-01	1,80E-01	1,18E+00	1,16E+00
Materialbedarf					kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg
Bentonit					-	-	-	7,56E-03	0,00E+00
Brantkalk					-	-	-	-	-
Pellets					-	-	-	-	1,60E-02
Kalkstein					-	-	-	5,77E-03	3,53E-02
Luft					-	-	-	-	-
Wasser					-	-	-	-	-
Em. in Luft					kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg
C2F6					-	-	-	-	-
CF4					-	-	-	-	-
CH4					-	-	-	-	-
CO					-	-	-	-	(n) 1,74E-04
CO2					-	-	-	-	(n) 1,02E-01
HCl					-	-	-	-	-
HF					-	-	-	-	-
N2O					-	-	-	-	-
NH3					-	-	-	-	-
NMVOC					-	-	-	-	-
NOx					-	-	-	-	(n) 4,87E-04
SO2					-	-	-	-	(n) 7,41E-04
Staub					-	-	-	-	7,67E-04

¹⁾ Internationaler Strommix, hier verknüpft mit Modul UCPTIE.

²⁾ Wird im Prozeß "Hochofen" als Gesamteintrag erfaßt um Kovarianzen einzuschließen.

Tabelle C.6: Kovarianzen der Energieträger bei der Eisenerzpelletierung.

s_{xy}/n	Strom int.	Steinkohle	Erdgas	Öl S	Öl EL
Strom int.	0,00E+00	2,69E-04	-2,51E-03	1,54E-03	-3,78E-04
Steinkohle	2,69E-04	0,00E+00	-3,13E-03	-6,75E-03	-5,49E-04
Erdgas	-2,51E-03	-3,13E-03	0,00E+00	-7,11E-03	5,78E-04
Öl S	1,54E-03	-6,75E-03	-7,11E-03	0,00E+00	-1,24E-03
Öl EL	-3,78E-04	-5,49E-04	5,78E-04	-1,24E-03	0,00E+00

Tabelle C.7: Massenbilanz für den Einzelprozeß Eisenerzpelletierung.

Eingang [kg]	$\langle x \rangle$	m
Energieträger	1,78E-02	5,61E-03
Luft ¹⁾	(b) 1,77E-01	(b) 5,65E-02
Material	1,34E+00	1,52E-01
Σ	1,54E+00	1,62E-01
Ausgang [kg]	$\langle x \rangle$	m
Produkt	1,00E+00	0,00E+00
Abgas ¹⁾	(b) 1,93E-01	(b) 6,15E-02
Em. in Luft	3,06E-01	1,53E-01
Asche	4,03E-04	2,69E-04
Σ	1,50E+00	1,53E-01
¹⁾ stöchiometrisch aus Energieträgerbedarf		

Tabelle C.8: Prozeßspezifische Daten für den Einzelprozeß Kalksteinabbau. Die Angaben beziehen sich auf 1 kg Kalkstein.

	<x>	m	s	n	Habersatter	Merten	SRU 250
Energieträger	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg		MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg
Strom UCPTe	6,30E-03	6,30E-03	8,91E-03	2	1,26E-02	-	0,00E+00
Steinkohle	2,77E-03	2,77E-03	3,92E-03	2	5,55E-03	-	0,00E+00
Erdgas	3,53E-03	3,53E-03	4,99E-03	2	7,05E-03	-	0,00E+00
Öl S	1,64E-03	1,64E-03	2,32E-03	2	3,28E-03	-	0,00E+00
Öl EL	7,32E-02	4,12E-02	5,83E-02	2	3,20E-02	-	1,14E-01
thermisch	8,12E-02	3,33E-02	4,70E-02	2	4,79E-02	-	1,14E-01
Materialbedarf	kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg
Kalkstein	-1,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1	-	-	1,10E-01
Rohkalkstein	1,10E+00	5,50E-02	5,50E-02	1	-	-	-
Em. in Luft	kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg
C2F6	-	-	-	0	-	-	-
CF4	-	-	-	0	-	-	-
CH4	-	-	-	0	-	-	-
CO	-	-	-	0	-	-	-
CO2	-	-	-	0	-	-	-
HCl	-	-	-	0	-	-	-
HF	-	-	-	0	-	-	-
N2O	-	-	-	0	-	-	-
NH3	-	-	-	0	-	-	-
NMVOC	-	-	-	0	-	-	-
NOx	-	-	-	0	-	-	-
SO2	-	-	-	0	-	-	-
Staub	4,25E-02	2,95E-02	4,17E-02	2	7,20E-02	1,30E-02	-
	kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg
Abraum ¹⁾	1,10E-01	5,50E-02	5,50E-02	1	-	-	1,10E-01

¹⁾ Kalkstein-Rückführung in Steinbruch

Tabelle C.9: Kovarianzen der Energieträger beim Abbau von Kalkstein.

s _{xy} /n	Strom UCPTe	Steinkohle	Erdgas	Öl S	Öl EL
Strom UCPTe	0,00E+00	1,75E-05	2,22E-05	1,03E-05	-2,60E-04
Steinkohle	1,75E-05	0,00E+00	9,78E-06	4,55E-06	-1,14E-04
Erdgas	2,22E-05	9,78E-06	0,00E+00	5,79E-06	-1,45E-04
Öl S	1,03E-05	4,55E-06	5,79E-06	0,00E+00	-6,76E-05
Öl EL	-2,60E-04	-1,14E-04	-1,45E-04	-6,76E-05	0,00E+00

Tabelle C.10: Massenbilanz für den Einzelprozeß Kalksteinabbau.

Eingang [kg]	<x>	m
Energieträger	1,94E-03	9,74E-04
Luft ¹⁾	(b) 2,49E-02	(b) 1,30E-02
Material	1,10E+00	5,50E-02
Σ	1,13E+00	5,65E-02
Ausgang [kg]	<x>	m
Produkt	1,00E+00	0,00E+00
Abgas ¹⁾	(b) 2,68E-02	(b) 1,40E-02
Abraum	1,10E-01	5,50E-02
Σ	1,14E+00	5,68E-02

¹⁾ stöchiometrisch aus Energieträgerbedarf

Tabelle C.11: Prozeßspezifische Daten für den Einzelprozeß Kalzinierung von Kalkstein. Die Angaben beziehen sich auf 1 kg Branntkalk.

	<x>	m	s	n	IIabersatter	stöchiom. Berechnung	Merten	SRU 250	
Energieträger	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg		MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg
Strom UCPTB	1,64E-01	3,52E-02	6,09E-02	3	1,29E-01	-	2,34E-01	(u) 1,29E-01	-
Steinkohle	3,93E+00	1,17E+00	1,65E+00	2	2,77E+00	-	5,10E+00	-	-
Erdgas	1,02E+00	1,02E+00	1,44E+00	2	2,03E+00	-	0,00E+00	-	-
Öl S	3,82E-02	3,82E-02	5,40E-02	2	7,63E-02	-	0,00E+00	-	-
Öl EL	7,62E-02	7,62E-02	1,08E-01	2	1,52E-01	-	0,00E+00	-	-
thermisch	5,36E+00	4,71E-01	7,08E-01	4	5,03E+00	-	5,10E+00	(u) [3,50E+00 ; 7,8E+00]	-
Materialbedarf	kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg
Branntkalk	-1,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1	-	-	-	-	-
Kalkstein	1,95E+00	5,00E-02	7,07E-02	2	2,00E+00	-	1,90E+00	-	-
Em. in Luft	kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg
C2F6	-	-	-	0	-	-	-	-	-
CF4	-	-	-	0	-	-	-	-	-
CH4	-	-	-	0	-	-	-	-	-
CO	-	-	-	0	-	-	-	-	-
CO2	8,00E-01	2,21E-02	4,21E-02	4	-	[7,85E-01 ; 8,79E-01]	7,50E-01	7,86E-01	-
HCl	-	-	-	0	-	-	-	-	-
HF	-	-	-	0	-	-	-	-	-
N2O	-	-	-	0	-	-	-	-	-
NH3	-	-	-	0	-	-	-	-	-
NMVOCC	-	-	-	0	-	-	-	-	-
NOx	-	-	-	0	-	-	-	-	-
SO2	-	-	-	0	-	-	-	-	-
Wasserdampf	7,50E-02	7,50E-02	1,06E-01	2	0,00E+00	-	1,50E-01	-	-
Staub	1,80E-02	9,00E-03	9,00E-03	1	1,80E-02	-	-	-	-

Das Kalzinieren von Kalkstein erfolgt gemäß der Reaktionsgleichung $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{Ca} + \text{CaO}$. Ausgehend von 1 kg erzeugtem Branntkalk werden stöchiometrisch 0,78 kg CO_2 freigesetzt. Andererseits werden etwa 2 kg Kalkstein benötigt, was einer Erzeugung von 0,88 kg CO_2 entspricht. Aus dieser Überlegung wird das CO_2 -Intervall in Tabelle C.5 bestimmt.

Tabelle C.12: Kovarianzen der Energieträger bei der Kalzination von Kalkstein.

s_x/n	Strom UCPTB	Steinkohle	Erdgas	Öl S	Öl EL
Strom UCPTB	0,00E+00	6,16E-02	-5,36E-02	-2,01E-03	-4,02E-03
Steinkohle	6,16E-02	0,00E+00	-1,19E+00	-4,45E-02	-8,90E-02
Erdgas	-5,36E-02	-1,19E+00	0,00E+00	3,88E-02	7,75E-02
Öl S	-2,01E-03	-4,45E-02	3,88E-02	0,00E+00	2,91E-03
Öl EL	-4,02E-03	-8,90E-02	7,75E-02	2,91E-03	0,00E+00

Tabelle C.13: Massenbilanz für den Einzelprozeß Kalzination von Kalkstein.

Eingang [kg]	<x>	m
Energieträger	1,63E-01	4,73E-02
Luft ¹⁾	(b) 1,27E+00	(b) 3,57E-01
Material	1,95E+00	5,00E-02
Σ	3,38E+00	3,64E-01
Ausgang [kg]	<x>	m
Produkt	1,00E+00	0,00E+00
Abgas ¹⁾	(b) 1,39E+00	(b) 3,95E-01
Em. in Luft	(b) 8,93E-01	7,87E-02
Abfall	9,10E-02	9,10E-02
Σ	3,38E+00	4,13E-01

¹⁾stöchiometrisch aus Energieträgerbedarf

Tabelle C.14: Prozeßspezifische Daten für den Einzelprozeß Sinterung von Eisenerz (Teil 1). Die Angaben beziehen sich auf 1 kg Sinter.

	<x>	m	s	n	Habersatter	Frisknecht	Merten ⁵⁾	Wagner	Bogdandy	Jahrbuch 89
Energieträger	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg		MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg
Strom St.Ind. ¹⁾	9,38E-02	5,67E-03	2,66E-02	22	1,08E-01	1,28E-01	(n) 1,22E-01	1,24E-01	1,12E-01	1,22E-01
Öl S (p)	4,00E-05	4,00E-05	1,79E-04	20	0,00E+00	0,00E+00	-	8,00E-04	0,00E+00	0,00E+00
Koks (p)	1,38E+00	3,71E-02	2,36E-01	42	2,05E+00	1,80E+00	(n) 1,40E+00	1,91E+00	1,32E+00	1,44E+00
Gichtgas (p)	1,24E-02	9,05E-03	4,05E-02	20	0,00E+00	0,00E+00	-	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Koksgas (p)	1,50E-01	7,28E-02	3,25E-01	20	0,00E+00	1,74E-01	(n) 1,79E-01	2,13E-01	9,17E-02	1,79E-01
thermisch	1,50E+00	6,72E-02	2,93E-01	19	2,05E+00	1,97E+00	-	2,12E+00	1,41E+00	1,62E+00
Materialbedarf	kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg
Brannkalk	6,63E-03	4,32E-03	1,06E-02	6	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-	-	0,00E+00
Eisenerz ²⁾	(n) 7,96E-01	(n) 3,56E-02	(n) 9,77E-02	8	8,85E-01	6,10E-01	8,61E-01	-	-	8,66E-01
Sinter	-1,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1	-	-	-	-	-	-
Kalkstein ²⁾	(n) 1,26E-01	(n) 1,58E-02	(n) 4,33E-02	8	1,15E-01	4,90E-02	1,47E-01	-	-	1,53E-01
Luft	2,27E+00	5,29E-02	9,16E-02	3	-	-	-	-	-	-
Schlacke u.ä. ³⁾	8,67E-02	4,33E-02	4,33E-02	1	-	-	(n) 9,80E-02	-	-	8,67E-02
Zuschläge	1,50E-01	7,50E-02	7,50E-02	1	-	-	-	-	-	-
Stäube	1,20E-02	4,00E-03	4,00E-03	2	-	-	-	-	-	-
Em. in Luft	kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg
Abluft	2,35E+00	8,32E-02	1,33E-01	3	-	-	-	-	-	-
CH ₄	1,80E-04	1,21E-04	1,70E-04	2	-	3,00E-04	-	-	-	-
CO	9,32E-03	4,80E-03	8,31E-03	3	-	1,00E-05	-	-	-	-
CO ₂ ⁴⁾	1,52E-01	3,44E-03	2,15E-02	39	-	1,90E-01	-	2,16E-01	1,49E-01	1,62E-01
HCl	4,31E-05	2,17E-05	3,76E-05	3	-	-	-	-	-	-
HF	7,41E-06	3,75E-06	6,50E-06	3	-	-	-	-	-	-
N ₂ O	5,00E-06	2,50E-06	2,50E-06	1	-	-	-	-	-	-
NH ₃	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1	-	-	-	-	-	-
NM _{VOC}	7,95E-05	2,05E-05	2,90E-05	2	-	1,00E-04	-	-	-	-
NO _x	6,40E-04	6,44E-05	2,65E-04	17	-	1,50E-03	-	-	-	-
Staub	5,29E-04	1,14E-04	1,14E-04	2	-	(n) 5,00E-04	-	-	-	-

¹⁾Strom stammt in Stahlindustrie anteilig aus Eigenerzeugung, hier: verknüpft mit Modul UCPTF.

	Kugeler	Cappel	Krumm							
Energieträger	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg
Strom St.Ind. ¹⁾	(u) 1,26E-01	8,28E-02	1,22E-01	1,12E-01	1,04E-01	9,72E-02	9,36E-02	8,82E-02	7,38E-02	6,84E-02
Öl S (p)	-	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Koks (p)	-	1,77E+00	1,29E+00	1,29E+00	1,29E+00	1,29E+00	1,29E+00	1,29E+00	1,29E+00	1,29E+00
Gichtgas (p)	-	0,00E+00	2,24E-03	2,24E-03	2,24E-03	2,24E-03	2,24E-03	2,24E-03	0,00E+00	0,00E+00
Koksgas (p)	-	2,11E-01	6,72E-02	6,28E-02	6,28E-02	5,26E-02	5,84E-02	5,26E-02	1,90E-02	1,90E-02
thermisch	-	1,98E+00	1,36E+00	1,35E+00	1,35E+00	1,34E+00	1,35E+00	1,34E+00	1,31E+00	1,31E+00
Materialbedarf	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg
Brannkalk	-	-	2,40E-02	-	-	-	-	-	-	-
Eisenerz ²⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sinter	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kalkstein ²⁾	-	-	9,77E-02	-	-	-	-	-	-	-
Luft	-	2,17E+00	-	-	-	-	-	-	-	-
Schlacke u.ä. ³⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Zuschläge	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Stäube	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Em. in Luft	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg
Abluft	-	2,49E+00	-	-	-	-	-	-	-	-
CH ₄	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CO ₂ ⁴⁾	-	2,00E-01	(b) 1,45E-01	(b) 1,45E-01	(b) 1,45E-01	(b) 1,45E-01	(b) 1,45E-01	(b) 1,45E-01	(b) 1,45E-01	(b) 1,45E-01
HCl	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
HF	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
N ₂ O	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NH ₃	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NM _{VOC}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NO _x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Staub	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

²⁾ Wird im Prozeß "Hochofen" als Gesamteintrag erfaßt um Kovarianzen einzuschließen.

³⁾ Abbrände, Zunder, Schlacken, Stäube

Tabelle C.15: Prozeßspezifische Daten für den Einzelprozeß Sinterung von Eisenerz (Teil 2). Die Angaben beziehen sich auf 1 kg Sinter.

	Krumm				Gemis 3.0	IKARUS	SRU 250	Gemis 2.1	Penkuhn	
Energieträger	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg
Strom St.Ind. ¹⁾	6,12E-02	5,94E-02	5,58E-02	5,40E-02	5,00E-02	(u) 1,22E-01	-	(u) 1,00E-01	-	-
Öl S (p)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	(u) 0,00E+00	-	-	-	-
Koks (p)	1,29E+00	1,29E+00	1,29E+00	1,29E+00	1,17E+00	-	-	-	-	-
Gichtgas (p)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,75E-01	(u) 5,98E-02	-	-	-	-
Koksgas (p)	1,46E-02	1,75E-02	1,17E-02	1,17E-02	1,75E-01	(u) 1,50E+00	-	-	-	-
thermisch	1,30E+00	1,30E+00	1,30E+00	1,30E+00	1,52E+00	-	-	-	-	-
Materialbedarf	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg
Brannkalk	-	-	-	-	-	-	1,58E-02	(n) 4,00E-04	-	-
Eisenerz ²⁾	-	-	-	-	8,70E-01	-	8,28E-01	-	-	-
Sinter	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kalkstein ²⁾	-	-	-	-	-	-	1,08E-01	-	-	-
Luft	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Schlacke u.ä. ³⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Zuschläge	-	-	-	-	1,50E-01	-	-	-	-	-
Stäube	-	-	-	-	-	-	-	-	[4,00E-03;2E-02]	
Em. in Luft	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg
Abluft	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CH ₄	-	-	-	-	5,90E-05	-	-	-	-	-
CO	-	-	-	-	1,19E-02	-	-	1,60E-02	-	-
CO ₂ ⁴⁾	(b) 1,45E-01	(b) 1,45E-01	(b) 1,45E-01	(b) 1,45E-01	1,42E-01	-	-	(n) 2,00E-02	-	-
HCl	-	-	-	-	0,00E+00	-	-	-	-	-
HF	-	-	-	-	0,00E+00	-	-	-	-	-
N ₂ O	-	-	-	-	5,00E-06	-	-	-	-	-
NH ₃	-	-	-	-	0,00E+00	-	-	-	-	-
NM VOC	-	-	-	-	5,90E-05	-	-	-	-	-
NO _x	-	-	-	-	3,56E-04	-	-	-	-	-
Staub	-	-	-	-	8,30E-04	-	-	-	-	-

⁴⁾ stöchiometrische Berechnung, C-Gehalt des Kokses: 88% ⁵⁾ Daten teilweise aus Jahrbuch 89.

	Ziegenbalg		UBA 5/96		Lünen 91					
Energieträger	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg
Strom St.Ind. ¹⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Öl S (p)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Koks (p)	-	-	(u) [1,14E+00;2,29E+00]		(u) 1,08E+00	(u) 1,12E+00	(u) 1,24E+00	(u) 1,20E+00	(u) 1,08E+00	(u) 1,24E+00
Gichtgas (p)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Koksgas (p)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
thermisch	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Materialbedarf	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg
Brannkalk	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Eisenerz ²⁾	-	-	[6,50E-01;8,00E-01]		-	-	-	-	-	-
Sinter	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kalkstein ²⁾	-	-	[1,1E-01;2,30E-01]		-	-	-	-	-	-
Luft	-	-	2,33E+00	2,33E+00	-	-	-	-	-	-
Schlacke u.ä. ³⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Zuschläge	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Stäube	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Em. in Luft	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg
Abluft	-	-	[2,13E+00;2,44E+00]		-	-	-	-	-	-
CH ₄	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CO ₂ ⁴⁾	-	-	-	-	(b) 1,22E-01	(b) 1,26E-01	(b) 1,40E-01	(b) 1,35E-01	(b) 1,22E-01	(b) 1,40E-01
HCl	6,07E-05	6,87E-05	-	-	-	-	-	-	-	-
HF	1,01E-05	1,21E-05	-	-	-	-	-	-	-	-
N ₂ O	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NH ₃	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NM VOC	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NO _x	-	4,04E-04	-	-	6,49E-04	6,15E-04	5,13E-04	-	5,81E-04	-
Staub	1,52E-04	6,07E-04	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabelle C.16: Prozeßspezifische Daten für den Einzelprozeß Sinterung von Eisenerz (Teil 3). Die Angaben beziehen sich auf 1 kg Sinter.

Längen 91										
Energieträger	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg
Strom St.Ind. ¹⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Öl S (p)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Koks (p)	(u) 1,16E+00	(u) 1,28E+00	(u) 1,16E+00	(u) 1,52E+00	(u) 1,56E+00	(u) 1,56E+00	(u) 1,28E+00	(u) 1,48E+00	(u) 1,70E+00	(u) 1,22E+00
Gichtgas (p)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Koksgas (p)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
thermisch	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Materialbedarf	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg
Brannkalk	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Eisenerz ²⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sinter	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kalkstein ³⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Luft	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Schlacke u.ä. ³⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Zuschläge	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Stäube	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Em. in Luft	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg
Abluft	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CH ₄	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CO ₂ ⁴⁾	(b) 1,31E-01	(b) 1,44E-01	(b) 1,31E-01	(b) 1,71E-01	(b) 1,76E-01	(b) 1,76E-01	(b) 1,44E-01	(b) 1,67E-01	(b) 1,91E-01	(b) 1,37E-01
HCl	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
HF	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
N ₂ O	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NH ₃	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NMVOC	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NO _x	5,13E-04	6,49E-04	6,15E-04	-	8,20E-04	8,20E-04	6,15E-04	4,44E-04	-	6,49E-04
Staub	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Längen 91					
Energieträger	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg
Strom St.Ind. ¹⁾	-	-	-	-	-
Öl S (p)	-	-	-	-	-
Koks (p)	(u) 1,16E+00	(u) 1,38E+00	(u) 1,48E+00	(u) 1,38E+00	(u) 1,58E+00
Gichtgas (p)	-	-	-	-	-
Koksgas (p)	-	-	-	-	-
thermisch	-	-	-	-	-
Materialbedarf	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg
Brannkalk	-	-	-	-	-
Eisenerz ²⁾	-	-	-	-	-
Sinter	-	-	-	-	-
Kalkstein ³⁾	-	-	-	-	-
Luft	-	-	-	-	-
Schlacke u.ä. ³⁾	-	-	-	-	-
Zuschläge	-	-	-	-	-
Stäube	-	-	-	-	-
Em. in Luft	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg
Abluft	-	-	-	-	-
CH ₄	-	-	-	-	-
CO	-	-	-	-	-
CO ₂ ⁴⁾	(b) 1,31E-01	(b) 1,55E-01	(b) 1,67E-01	(b) 1,55E-01	(b) 1,78E-01
HCl	-	-	-	-	-
HF	-	-	-	-	-
N ₂ O	-	-	-	-	-
NH ₃	-	-	-	-	-
NMVOC	-	-	-	-	-
NO _x	7,86E-04	3,42E-04	-	-	-
Staub	-	-	-	-	-

Tabelle C.17: Kovarianzen der Energieträger bei der Sinterung von Eisenerz.

s_{xy}/n	Strom St.Ind.	Öl S	Koks	Gichtgas	Koksgas
Strom St.Ind.	0,00E+00	7,88E-08	1,77E-04	-2,01E-05	4,38E-05
Öl S	7,88E-08	0,00E+00	1,16E-06	-2,32E-08	3,14E-07
Koks	1,77E-04	1,16E-06	0,00E+00	-1,31E-04	4,13E-04
Gichtgas	-2,01E-05	-2,32E-08	-1,31E-04	0,00E+00	4,86E-05
Koksgas	4,38E-05	3,14E-07	4,13E-04	4,86E-05	0,00E+00

Tabelle C.18: Massenbilanz für den Einzelprozeß Eisenerzsinterung.

Eingang [kg]	$\langle x \rangle$	m
Energieträger	5,67E-02	4,16E-03
Luft ¹⁾	(b) 1,26E-05	(b) 1,26E-05
Material	3,45E+00	1,09E-01
Σ	3,51E+00	1,09E-01
Ausgang [kg]	$\langle x \rangle$	m
Produkt	1,00E+00	0,00E+00
Abgas ²⁾	2,50E+00	8,32E-02
Σ	3,50E+00	8,32E-02
¹⁾ stöchiometrisch aus Energieträgerbedarf		
²⁾ Sinterabluft und Abgase		

Tabelle C.19: Prozeßspezifische Daten für den Einzelprozeß Hochofen (Teil 1). Die Angaben beziehen sich auf 1 kg Roheisen.

	<x>	m	s	n	Flabersatter ⁹⁾	Frisknecht ^{6,8)}	Merten	Wagner	Längen 95	Jahrbuch 93	Kugeler ⁹⁾
Energieträger	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg		MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg
Strom St.Ind. ¹⁾	2,55E-01	3,16E-02	1,00E-01	10	(u) 4,32E-01	(n) 2,03E-01	1,19E-01	2,70E-01	-	(9) 2,03E-01	(u) 2,88E-01
Steinkohle (p)	2,10E+00	3,76E-01	1,88E+00	25	-	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	(u) 3,38E+00	(u) 1,88E+00	-
Erdgas	1,02E-01	5,02E-02	1,81E-01	13	-	0,00E+00	0,00E+00	5,13E-01	-	-	-
Öl S (p)	4,42E-01	2,09E-01	1,03E+00	24	-	9,30E-01	0,00E+00	9,60E-01	(u) 0,00E+00	-	-
Koks (p)	1,15E+01	3,33E-01	1,70E+00	26	-	1,27E+01	1,26E+01	1,29E+01	(u) 1,07E+01	(u) 1,11E+01	(u) 1,49E+01
Dampf ⁶⁾	4,13E-02	2,78E-02	9,63E-02	12	-	0,00E+00	0,00E+00	2,50E-01	-	-	-
Gichtgas (p)	-4,22E+00	1,54E-01	9,48E-01	38	(n) -4,00E+00	-5,61E+00	-4,64E+00	-4,60E+00	-	(u) -5,73E+00	(n) -6,18E+00
Koksgas	8,76E-01	3,12E-01	1,12E+00	13	-	2,74E+00	2,62E+00	2,24E+00	-	(u) 2,23E+00	-
thermisch	1,15E+01	2,65E-01	9,54E-01	13	(u) 1,26E+01	1,07E+01	1,06E+01	1,22E+01	-	-	-
Materialbedarf	kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg
Brannkalk	3,00E-02	1,50E-02	1,50E-02	1	-	-	-	-	-	-	-
Eisenerz ³⁾	1,38E+00	1,73E-02	4,57E-02	7	1,32E+00	1,38E+00	1,34E+00	-	1,38E+00	1,44E+00	-
(Stückerz)	1,97E-01	2,95E-02	7,79E-02	7	2,78E-01	1,04E-01	2,00E-01	-	1,87E-01	1,57E-01	-
(Sinter)	8,99E-01	9,21E-02	2,44E-01	7	1,17E+00	4,07E-01	8,00E-01	-	1,01E+00	9,42E-01	-
(Pellets)	4,40E-01	1,18E-01	3,12E-01	7	0,00E+00	1,04E+00	4,42E-01	-	3,88E-01	4,71E-01	-
Kalkstein ³⁾	1,37E-01	2,36E-03	3,33E-03	2	1,35E-01	(n) 2,52E-01	1,34E-01	-	-	-	-
Luft	1,66E+00	8,57E-02	1,71E-01	4	-	-	1,71E+00	-	-	-	1,86E+00
Roheisen	-1,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1	-	-	-	-	-	-	-
Sauerstoff	1,64E-02	1,19E-02	2,38E-02	4	-	1,50E-02	0,00E+00	-	-	-	0,00E+00
Schlacke u.ä. ⁴⁾	2,70E-02	7,00E-03	9,90E-03	2	-	-	2,00E-02	-	-	3,40E-02	-
Schrott	3,33E-03	9,32E-04	1,32E-03	2	-	-	-	-	-	4,26E-03	-
Wasser	1,35E+00	6,75E-01	6,75E-01	1	-	-	1,35E+00	-	-	-	-
Zuschläge	2,15E-02	5,57E-03	1,11E-02	4	2,83E-02	-	-	-	1,43E-02	3,34E-02	-
Schlacke	-3,06E-01	2,48E-02	9,12E-02	15	-3,78E-01	-3,20E-01	-2,55E-01	-4,98E-01	-2,61E-01	-2,58E-01	-
Stäube	-1,23E-02	1,81E-03	4,10E-03	6	-	-	-	-	-	-1,22E-02	-
Em. in Luft	kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg
C2F6	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-
CF4	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-
CH4	2,45E-06	5,38E-07	1,42E-06	7	-	5,00E-06	-	-	-	-	-
CO	1,97E-04	1,54E-04	4,36E-04	8	-	5,50E-05	-	-	-	-	-
CO2 ³⁾	7,39E-01	1,06E-01	3,17E-01	9	-	(n) 1,47E+00	(b) 2,16E-01	(b) 3,26E-01	(n) 1,21E+00	-	-
HCl	8,69E-07	1,68E-07	4,11E-07	6	-	-	-	-	-	-	-
HF	9,15E-08	1,77E-08	4,33E-08	6	-	-	-	-	-	-	-
N2O	1,01E-06	1,95E-07	4,78E-07	6	-	-	-	-	-	-	-
NH3	1,97E-08	3,81E-09	9,33E-09	6	-	-	-	-	-	-	-
NMVO	7,65E-06	1,39E-06	3,68E-06	7	-	5,00E-06	-	-	-	-	-
NOx	2,04E-04	5,14E-05	1,45E-04	8	-	5,25E-04	-	-	-	-	-
SO2	2,17E-04	8,28E-05	3,10E-04	14	-	1,19E-03	-	-	-	-	-
Wasserdampf	1,12E+00	5,60E-01	5,60E-01	1	-	-	1,12E+00	-	-	-	-
Staub	1,12E-04	6,38E-05	2,47E-04	15	-	(n) 9,55E-04	-	-	-	-	-
Abwasser	kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg
	2,30E-01	1,15E-01	1,15E-01	1	-	-	2,30E-01	-	-	-	-
Gichtgasschl.	kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg
	1,33E-02	6,44E-03	1,11E-02	3	-	-	-	-	-	-	-

Keine Allokationen.

¹⁾Strom stammt in Stahlindustrie anteilig aus Eigenerzeugung, hier: verknüpft mit Modul UCPT.

Tabelle C.20: Prozeßspezifische Daten für den Einzelprozeß Hochofen (Teil 2). Die Angaben beziehen sich auf 1 kg Roheisen.

	Schaefer	Penkuhn		Knop	Gemis 3.0 ⁸⁾	SRU 250	VDEH	Krumm ⁷⁾	
Energieträger	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg		MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg
Strom St.Ind. ¹⁾	-	-	-	3,64E-01	(n) 2,03E-01	-	-	2,40E-01	2,40E-01
Steinkohle (p)	-	-	-	5,04E+00	1,74E+00	(u) 3,66E+00	-	0,00E+00	0,00E+00
Erdgas	-	-	-	0,00E+00	0,00E+00	-	-	0,00E+00	1,00E-01
Öl S (p)	-	-	-	0,00E+00	9,66E-01	(u) 0,00E+00	-	0,00E+00	0,00E+00
Koks (p)	-	-	-	9,71E+00	1,14E+01	(u) 9,19E+00	-	1,36E+01	1,36E+01
Dampf ²⁾	-	-	-	0,00E+00	0,00E+00	-	-	0,00E+00	0,00E+00
Gichtgas (p)	-	-	-	-2,08E+00	-4,00E+00	-	-	-2,59E+00	-3,45E+00
Koksgas	-	-	-	0,00E+00	0,00E+00	-	-	4,86E-01	6,53E-01
thermisch	-	-	-	1,27E+01	1,01E+01	-	-	1,15E+01	1,09E+01
Materialbedarf	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg
Brannkalk	-	-	-	-	3,00E-02	-	-	-	-
Eisenerz ³⁾	-	-	-	(n) 1,41E+00	1,44E+00	1,38E+00	-	-	-
(Stückerz)	-	-	-	-	1,30E-01	3,19E-01	-	-	-
(Sinter)	-	-	-	-	1,02E+00	9,42E-01	-	-	-
(Pellets)	-	-	-	-	4,65E-01	2,76E-01	-	-	-
Kalkstein ³⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Luft	-	-	-	-	-	-	-	1,46E+00	1,60E+00
Roheisen	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sauerstoff	-	-	-	5,05E-02	-	-	-	-	-
Schlacke u.ä. ⁴⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Schrott	-	-	-	-	-	-	2,40E-03	-	-
Wasser	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Zuschläge	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Schlacke	-5,15E-01	[-3,00E-01;-2,20E-01]		-	-2,35E-01	-2,67E-01	-3,10E-01	-	-
Stäube	-	[-2,20E-01;-7,00E-03]		-	-5,00E-03	-1,49E-02	-	-	-
Em. in Luft	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg
C2F6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CF4	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CH4	-	-	-	-	-	-	-	(b) 1,23E-06	(b) 1,08E-06
CO	-	-	-	-	1,28E-03	-	-	(b) 2,47E-05	(b) 2,16E-05
CO2 ⁵⁾	-	-	-	(b) 1,02E+00	-	(n) 1,04E+00	-	(b) 8,55E-01	(b) 6,33E-01
HCl	-	-	-	-	-	-	-	(b) 5,30E-07	(b) 4,63E-07
HF	-	-	-	-	-	-	-	(b) 5,58E-08	(b) 4,88E-08
N2O	-	-	-	-	-	-	-	(b) 6,17E-07	(b) 5,39E-07
NH3	-	-	-	-	-	-	-	(b) 1,20E-08	(b) 1,05E-08
NMVOC	-	-	-	-	-	-	-	(b) 4,93E-06	(b) 4,31E-06
NOx	-	-	-	-	1,33E-04	-	-	(b) 9,87E-05	(b) 8,62E-05
SO2	-	-	-	-	6,66E-05	-	-	-	-
Wasserdampf	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Staub	-	-	-	-	1,00E-03	-	-	-	-
	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg
Abwasser	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg
Gichtgasschl.	-	[-1,10E-02;-3,00E-03]		-	-	-2,60E-02	-	-	-

²⁾ Verknüpft mit Feuerung Kohle, Brennstoffnutzungsgrad: 0,85

³⁾ Inklusive Einträge durch Sinter und Pellets.

Tabelle C.21: Prozeßspezifische Daten für den Einzelprozeß Hochofen (Teil 3). Die Angaben beziehen sich auf 1 kg Roheisen.

Energieträger	UBA 5/96									Peters ^{7,8)}
	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg
Strom St.Ind. ¹⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-	(n ²⁾ 2,03E-01
Steinkohle (p)	(u) 5,02E+00	(u) 4,12E+00	(u) 3,30E+00	(u) 3,27E+00	(u) 1,66E+00	(u) 3,39E+00	(u) 3,45E+00	(u) 3,15E+00	(u) 3,01E+00	0,00E+00
Erdgas	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,00E+00
Öl S (p)	(u) 0,00E+00	(u) 0,00E+00	(u) 0,00E+00	(u) 0,00E+00	(u) 0,00E+00	(u) 0,00E+00	(u) 0,00E+00	(u) 0,00E+00	(u) 0,00E+00	2,28E+00
Koks (p)	(u) 9,18E+00	(u) 9,78E+00	(u) 1,08E+01	(u) 1,13E+01	(u) 1,10E+01	(u) 1,03E+01	(u) 9,84E+00	(u) 1,11E+01	(u) 1,12E+01	1,16E+01
Dampf ²⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,00E+00
Gichtgas (p)	(u) [-5,10E00;-4,20E00]	-	-	-	-	-	-	-	-	-2,53E+00
Koksgas	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,00E+00
thermisch	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,14E+01
Materialbedarf	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg
Branntkalk	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Eisenerz ³⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
(Stückerz)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
(Sinter)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
(Pellets)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kalkstein ³⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Luft	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Roheisen	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sauerstoff	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Schlacke u.ä. ⁴⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Schrott	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Wasser	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Zuschläge	1,00E-02	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Schlacke	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Stäube	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Em. in Luft	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg
C2F6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CF4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CH4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	(b) 2,16E-06
CO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	(b) 4,32E-05
CO ₂ ⁵⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-	(b) 8,30E-01
HCl	-	-	-	-	-	-	-	-	-	(b) 9,29E-07
HF	-	-	-	-	-	-	-	-	-	(b) 9,77E-08
N ₂ O	-	-	-	-	-	-	-	-	-	(b) 1,08E-06
NH ₃	-	-	-	-	-	-	-	-	-	(b) 2,11E-08
NM VOC	-	-	-	-	-	-	-	-	-	(b) 8,64E-06
NO _x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	(b) 1,73E-04
SO ₂	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Wasserdampf	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Staub	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg
Abwasser	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg
Gichtpasschl.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

¹⁾ Schlacke, Walzzunder, Stäube

⁵⁾ Stöchiometrisch berechnet, abzüglich CO und CO₂-Gehalt in Gichtgas von 57% CO₂-Äquivalent.

Tabelle C.22: Prozeßspezifische Daten für den Einzelprozeß Hochofen (Teil 4). Die Angaben beziehen sich auf 1 kg Roheisen.

	Peters ^{7,8)}		Bogdany ⁷⁾	IKARUS			Janz	Längen 91		
Energieträger	MJ/kg						MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg
Strom St.Ind. ¹⁾	(n) 2,03E-01	(n) 2,03E-01	1,05E-01	2,93E-01	-	-	-	-	-	-
Steinkohle (p)	0,00E+00	5,35E+00	0,00E+00	1,18E+00	-	-	(u) 0,00E+00	-	-	-
Erdgas	0,00E+00	0,00E+00	3,02E-01	4,04E-01	-	-	(u) 0,00E+00	-	-	-
Öl S (p)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	9,93E-01	-	-	(u) 4,47E+00	-	-	-
Koks (p)	1,37E+01	8,80E+00	1,48E+01	1,24E+01	-	-	(u) 1,06E+01	-	-	-
Dampf ²⁾	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,45E-01	-	-	-	-	-	-
Gichtgas (p)	-2,30E+00	-3,26E+00	-1,86E+00	-3,76E+00	-	-	-	(u) -4,17E+00	(u) -4,26E+00	(u) -4,17E+00
Koksgas	0,00E+00	0,00E+00	1,83E-01	2,31E-01	-	-	-	-	-	-
thermisch	1,14E+01	1,09E+01	1,34E+01	1,17E+01	-	-	-	-	-	-
Materialbedarf	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg
Brantkalk	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Eisenerz ³⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
(Stückerz)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
(Sinter)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
(Pellets)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kalkstein ³⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Luft	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Roheisen	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sauerstoff	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Schlacke u.ä. ⁴⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Schrott	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Wasser	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Zuschläge	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Schlacke	-	-	-	<-2,60E-01>, [-3,10E-01;-1,50E-01]	-	-	-	-	-	-
Stäube	-	-	-	-1,30E-02	-	-	-	-	-	-
Em. in Luft	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg
C2F6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CF4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CH4	(b) 2,00E-06	(b) 1,90E-06	(b) 3,76E-06	-	-	-	-	-	-	-
CO	(b) 4,00E-05	(b) 3,80E-05	(b) 7,52E-05	-	-	-	-	-	-	-
CO2 ⁵⁾	(b) 9,43E-01	(b) 6,40E-01	(b) 1,18E+00	-	-	-	(n) 1,55E+00	-	-	-
HCl	(b) 8,60E-07	(b) 8,17E-07	(b) 1,62E-06	-	-	-	-	-	-	-
HF	(b) 9,05E-08	(b) 8,60E-08	(b) 1,70E-07	-	-	-	-	-	-	-
N2O	(b) 1,00E-06	(b) 9,50E-07	(b) 1,88E-06	-	-	-	-	-	-	-
NH3	(b) 1,95E-08	(b) 1,85E-08	(b) 3,67E-08	-	-	-	-	-	-	-
NM VOC	(b) 8,00E-06	(b) 7,60E-06	(b) 1,50E-05	-	-	-	-	-	-	-
NOx	(b) 1,60E-04	(b) 1,52E-04	(b) 3,01E-04	-	-	-	-	-	-	-
SO2	-	-	-	-	-	-	-	8,42E-05	1,05E-04	5,56E-04
Wasserdampf	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Staub	-	-	-	-	-	-	-	5,12E-05	2,96E-05	3,08E-05
Abwasser	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg
Gichtgasschl.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

⁵⁾ Schätzwerte nicht berücksichtigt

⁷⁾ CO₂-Emissionen aus Gichtgasverbrennung in Winderhitzer nicht berücksichtigt, CO₂-Anteil im Gichtgas berücksichtigt.

	Längen 91									
Energieträger	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg
Gichtgas (p)	(u) -5,30E+00	(u) -4,17E+00	(u) -3,30E+00	(u) -4,52E+00	(u) -4,78E+00	(u) -4,87E+00	(u) -4,17E+00	(u) -4,43E+00	(u) -4,35E+00	(u) -5,13E+00
Em. in Luft	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg
SO2	1,86E-04	-	-	3,33E-05	-	-	1,16E-04	1,41E-04	1,33E-04	2,00E-05
Staub	-	8,27E-05	5,39E-05	1,76E-05	-	-	2,85E-05	6,31E-05	8,26E-05	-
⁸⁾ (n): Bedarf an elektrischer Energie aus Jahrbuch 93 übernommen. Wert geht ein in Kovarianz aber nicht in Mittelwert.										
Energieträger	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg
Gichtgas (p)	(u) -4,87E+00	(u) -4,52E+00	4,52E+00	(u) -5,30E+00	(u) -5,22E+00	(u) -4,43E+00	(u) -4,43E+00	(u) -4,26E+00	(u) -4,78E+00	(u) -4,70E+00
Em. in Luft	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg
SO2	-	-	-	1,11E-05	1,56E-04	2,50E-04	-	-	-	-
Staub	-	5,44E-05	5,44E-05	-	-	9,88E-05	1,77E-05	1,41E-05	-	-

(9) Mit Werten nach Aichinger berechnet, repräsentativ für Stahlindustrie Deutschland (West) 1989.

Tabelle C.23: Kovarianzen der Energieträger beim Hochofenprozeß.

s_{xy}/h	Strom St.Ind.	Steinkohle	Erdgas	Öl S	Koks	Dampf	Gichtgas	Koksgas
Strom St.Ind.	0,00E+00	5,20E-03	1,63E-04	3,59E-04	-4,15E-03	2,28E-04	5,99E-04	-1,41E-03
Steinkohle	5,20E-03	0,00E+00	-7,47E-03	-2,99E-02	-2,52E-01	-1,97E-03	4,41E-02	-7,49E-02
Erdgas	1,63E-04	-7,47E-03	0,00E+00	1,66E-03	9,18E-03	1,31E-03	-2,37E-03	2,71E-03
Öl S	3,59E-04	-2,99E-02	1,66E-03	0,00E+00	-1,11E-02	1,75E-03	-1,69E-02	1,89E-03
Koks	-4,15E-03	-2,52E-01	9,18E-03	-1,11E-02	0,00E+00	1,29E-03	3,18E-03	3,74E-02
Dampf	2,28E-04	-1,97E-03	1,31E-03	1,75E-03	1,29E-03	0,00E+00	-2,97E-03	1,81E-03
Gichtgas	5,99E-04	4,41E-02	-2,37E-03	-1,69E-02	3,18E-03	-2,97E-03	0,00E+00	-8,73E-02
Koksgas	-1,41E-03	-7,49E-02	2,71E-03	1,89E-03	3,74E-02	1,81E-03	-8,73E-02	0,00E+00

Tabelle C.24: Massenbilanz für den Einzelprozeß Hochofen.

Eingang [kg]	$\langle x \rangle$	m
Energieträger ²⁾	5,20E-01	8,87E-02
Luft ¹⁾	(b) 4,73E-01	(b) 1,71E-01
Material	4,62E+00	6,81E-01
Σ	5,62E+00	7,08E-01
Ausgang [kg]	$\langle x \rangle$	m
Produkt	1,00E+00	0,00E+00
Energieträger ²⁾	2,47E+00	2,60E-02
Abgas ¹⁾	4,59E-01	1,61E-01
Wasserdampf	1,12E+00	5,60E-01
Material	3,19E-01	2,49E-02
Abwasser	2,30E-01	1,15E-01
Abfall	1,33E-02	6,44E-03
Σ	5,59E+00	1,15E-01
¹⁾ stöchiometrisch aus Verbrennung von Energieträgern		
²⁾ inklusive Dampf		

Tabelle C.25: Prozeßspezifische Daten für den Einzelprozeß Steinkohleförderung. Die Angaben beziehen sich auf 1 kg Steinkohle.

	Gewichtung Abbauart				7,50E-01 Untertage	2,50E-01 Tagebau
	<x>	m	s	n	Frischknecht	
Energieträger	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg		MJ/kg	MJ/kg
Strom int. ¹⁾	2,45E-01	1,10E-01	1,10E-01	2	3,09E-01	5,54E-02
Rohsteinkohle	4,69E+01	7,61E+00	7,61E+00	2	4,88E+01	4,18E+01
Steinkohle	-2,92E+01	0,00E+00	0,00E+00	1	-	-
Öl S	9,14E-02	4,95E-02	4,95E-02	2	1,20E-01	5,70E-03
Diesel	1,02E-01	1,41E-01	1,41E-01	2	2,10E-02	3,46E-01
thermisch	1,12E+00	2,80E-01	3,97E-01	2	8,42E-01	1,40E+00
Em. in Luft	kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg
C2F6	-	-	-	0	-	-
CF4	-	-	-	0	-	-
CH4	1,11E-02	5,65E-03	5,65E-03	2	1,44E-02	1,36E-03
CO	-	-	-	0	-	-
CO2	-	-	-	0	-	-
HCl	-	-	-	0	-	-
HF	-	-	-	0	-	-
N2O	-	-	-	0	-	-
NH3	-	-	-	0	-	-
NM VOC	-	-	-	0	-	-
NOx	-	-	-	0	-	-
SO2	-	-	-	0	-	-
Staub	1,50E-04	8,66E-05	8,66E-05	2	1,00E-04	3,00E-04
	kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg
Abraum	6,10E-01	2,61E-01	2,61E-01	2	6,70E-01	4,30E-01

¹⁾Internationaler Strommix, hier verknüpft mit Modul UCPTF.

Tabelle C.26: Kovarianzen der Energieträger bei der Steinkohleförderung.

s_{xy}/n	Strom int.	Steinkohle	Öl S	Diesel
Strom int.	0,00E+00	-2,22E-02	7,23E-03	-2,05E-02
Steinkohle	-2,22E-02	0,00E+00	-1,00E-02	2,84E-02
Öl S	7,23E-03	-1,00E-02	0,00E+00	-9,28E-03
Diesel	-2,05E-02	2,84E-02	-9,28E-03	0,00E+00

Tabelle C.27: Massenbilanz für den Einzelprozeß Steinkohleförderung.

Eingang [kg]	<x>	m
Energieträger	1,61E+00	2,61E-01
Luft ¹⁾	(b) 6,11E-02	(b) 4,70E-02
Material	0,00E+00	0,00E+00
Σ	1,68E+00	2,65E-01
Ausgang [kg]	<x>	m
Produkt	1,00E+00	0,00E+00
Abgas ¹⁾	(b) 6,57E-02	(b) 5,05E-02
Abraum	6,10E-01	2,61E-01
Σ	1,68E+00	2,66E-01

¹⁾stöchiometrisch aus Energieträgerbedarf

Tabelle C.28: Prozeßspezifische Daten für den Einzelprozeß Kokserzeugung (Teil 1). Die Angaben beziehen sich auf 1 kg Steinkohlenskoks.

	<x>	m	s	n	Habersatter	Frischknecht	Jahrbuch 93	Merten	Kugeler
Energieträger	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg		MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg
Strom St.Ind. ¹⁾	1,34E-01	2,01E-02	4,49E-02	5	1,80E-01	1,69E-01	1,36E-01	1,19E-01	-
Steinkohle (p)	3,90E+01	3,01E-01	7,95E-01	7	(u) 3,74E+01	3,88E+01	3,95E+01	3,94E+01	(n) 5,31E+01
Erdgas (p)	1,07E-01	8,16E-02	1,82E-01	5	(u) 0,00E+00	4,21E-01	1,13E-01	0,00E+00	-
Koks	-2,86E+01	0,00E+00	0,00E+00	1	-	-	-	-	-
Gichtgas (p)	1,10E+00	5,90E-01	1,02E+00	3	-	1,13E+00	2,11E+00	-	-
Koksgas (p)	2,34E+00	5,17E-01	8,96E-01	3	(n) 2,10E+00	2,18E+00	1,54E+00	-	-
	-7,92E+00	2,01E-01	4,19E-01	5	-	-7,60E+00	-8,50E+00	-(n) 8,48E+00	-(n) 7,04E+00
thermisch	7,07E+00	5,17E-01	8,96E-01	3	-	7,92E+00	6,14E+00	-	-
Materialbedarf	kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg
Rohbenzol	-1,12E-02	1,67E-03	3,72E-03	5	-	-	-1,06E-02	-9,00E-03	-1,77E-02
Rohteer	-4,65E-02	3,25E-03	7,25E-03	5	-	(n) 3,92E-02	-4,03E-02	-3,90E-02	-5,69E-02
Em. in Luft	kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg
C2F6	-	-	-	0	-	-	-	-	-
CF4	-	-	-	0	-	-	-	-	-
CH4	1,04E-04	4,13E-05	1,49E-04	13	-	(n) 2,80E-05	-	-	-
CO	9,44E-04	3,05E-04	8,08E-04	7	1,00E-03	(n) 8,00E-04	-	-	-
CO2 ²⁾	6,95E-01	3,02E-02	7,99E-02	7	(b) 5,34E-01	(b) 6,73E-01	(b) 7,39E-01	(b) 7,36E-01	-
HCl	-	-	-	0	-	-	-	-	-
HF	1,00E-06	5,00E-07	5,00E-07	1	1,00E-06	-	-	-	-
N2O	-	-	-	0	-	-	-	-	-
NH3	1,16E-04	7,51E-05	2,91E-04	15	-	(n) 5,60E-06	-	-	-
NM VOC	3,50E-04	1,75E-04	1,75E-04	1	-	(n) 8,00E-05	-	-	-
NOx	7,37E-04	8,24E-05	3,59E-04	19	5,00E-04	(n) 6,88E-04	-	-	-
SO2	5,65E-04	9,77E-05	4,37E-04	20	5,00E-04	(n) 3,44E-04	-	-	-
Staub	2,63E-04	5,81E-05	2,72E-04	22	1,10E-03	(n) 1,20E-04	-	-	-

Keine Allokationen.

¹⁾Strom stammt in Stahlindustrie anteilig aus Eigenerzeugung, hier: verknüpft mit Modul UCPTe.

	Bogdandy	RAG 1992	UBA 89 DS86	UBA 5/96		Knop	Rentz 90	Corinair 91	Ziegler
Energieträger	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg
Strom St.Ind. ¹⁾	6,68E-02	-	-	-	-	-	-	-	-
Steinkohle (p)	3,99E+01	-	-	3,89E+01	-	3,93E+01	-	-	-
Erdgas (p)	0,00E+00	-	-	-	-	-	-	-	-
Koks	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Gichtgas (p)	6,68E-02	-	-	-	-	-	-	-	-
Koksgas (p)	3,31E+00	-	-	-	-	-	-	-	-
	-7,54E+00	-	-	[-8,63E+00; -7,32E+00]		-	-	-	-
thermisch	7,14E+00	-	-	-	-	-	-	-	-
Materialbedarf	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg
Rohbenzol	-	-	-	[-1,04E-02; -8,06E-03]		-	-	-	-
Rohteer	-	-	-	[-5,04E-02; -4,60E-02]		-	-	-	-
Em. in Luft	kg/kg	kg/kg	kg/kg	UBA DS95	UBA BAT	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg
C2F6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CF4	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CH4	-	-	-	-	-	-	-	5,00E-04	-
CO	-	3,41E-04	2,00E-03	2,00E-03	-	-	-	-	1,00E-04
CO2 ²⁾	(b) 7,82E-01	-	-	(b) 6,84E-01	-	(b) 7,18E-01	-	-	-
HCl	-	-	-	-	-	-	-	-	-
HF	-	-	-	-	-	-	-	-	-
N2O	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NH3	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NM VOC	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NOx	-	-	(n) 1,00E-03	6,00E-04	-	-	6,90E-04	-	5,00E-04
SO2	-	-	5,00E-04	3,50E-04	3,00E-05	-	5,00E-04	-	5,00E-04
Staub	-	-	5,00E-04	1,50E-04	6,00E-05	-	9,30E-04	-	1,00E-04

Tabelle C.29: Prozeßspezifische Daten für den Einzelprozeß Kokserzeugung (Teil 2). Die Angaben beziehen sich auf 1 kg Steinkohlenkoks.

	Schucht	Bussmann	DGMK	LNRW 1993					
Energieträger	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg
Strom St.Ind. ¹⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Steinkohle (p)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Erdgas (p)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Koks	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Gichtgas (p)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Koksgas (p)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
thermisch	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Materialbedarf	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg
Rohbenzol	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Rohteer	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Em. in Luft	kg/kg	kg/kg	kg/kg	Krupp Mannesm.		Krupp Reinh.		Thyssen	
C2F6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CF4	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CH4	-	-	5,00E-05	-	-	-	-	2,65E-05	2,45E-05
CO	-	1,68E-04	-	-	-	-	-	-	-
CO2 ²⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
HCl	-	-	-	-	-	-	-	-	-
HF	-	-	-	-	-	-	-	-	-
N2O	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NH3	-	5,60E-06	-	4,77E-06	5,41E-07	8,29E-04	8,35E-04	5,46E-06	5,39E-06
NMVOC	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NOx	-	-	-	6,18E-04	5,86E-04	4,56E-04	4,81E-04	1,77E-03	1,43E-03
SO2	-	-	-	8,33E-04	5,11E-04	2,05E-03	3,19E-04	1,31E-03	7,99E-04
Staub	2,00E-04	4,50E-05	-	9,19E-05	7,26E-05	2,44E-04	1,63E-04	3,18E-04	1,91E-04

	LNRW 1993								Gemis 2.1
Energieträger	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg
Strom St.Ind. ¹⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Steinkohle (p)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Erdgas (p)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Koks	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Gichtgas (p)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Koksgas (p)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
thermisch	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Materialbedarf	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg
Rohbenzol	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Rohteer	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Em. in Luft	Prosper		Hassel		Zollverein		Kaiserstuhl		kg/kg
C2F6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CF4	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CH4	2,07E-05	1,17E-05	1,27E-04	5,16E-05	6,20E-05	2,61E-05	6,74E-05	3,06E-05	3,50E-04
CO	-	-	-	-	-	-	-	-	1,00E-03
CO2 ²⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
HCl	-	-	-	-	-	-	-	-	-
HF	-	-	-	-	-	-	-	-	-
N2O	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NH3	1,93E-05	7,78E-06	4,10E-06	3,16E-06	3,85E-06	3,45E-06	3,49E-06	4,08E-06	-
NMVOC	-	-	-	-	-	-	-	-	3,50E-04
NOx	7,46E-04	4,29E-04	7,84E-04	8,68E-04	6,82E-04	8,49E-04	7,78E-04	2,28E-04	-
SO2	2,73E-04	3,62E-04	5,34E-04	4,74E-04	4,46E-04	3,06E-04	4,13E-04	2,91E-04	-
Staub	9,80E-05	7,50E-05	4,12E-04	2,82E-04	1,05E-04	1,07E-04	3,33E-04	2,16E-04	-

Tabelle C.30: Kovarianzen der Energieträger bei der Kokserzeugung.

s_{xy}/n	Strom St.Ind.	Steinkohle	Erdgas	Koks	Gichtgas	Koksgas ¹⁾	Koksgas ²⁾
Strom St.Ind.	0,00E+00	-7,47E-03	1,97E-03	0,00E+00	3,55E-02	-3,07E-02	-1,67E-02
Steinkohle	-7,47E-03	0,00E+00	-1,22E-02	0,00E+00	-2,19E-01	1,90E-01	1,03E-01
Erdgas	1,97E-03	-1,22E-02	0,00E+00	0,00E+00	5,78E-02	-5,01E-02	-2,72E-02
Koks	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Gichtgas	3,55E-02	-2,19E-01	5,78E-02	0,00E+00	0,00E+00	-9,03E-01	-4,91E-01
Koksgas ¹⁾	-3,07E-02	1,90E-01	-5,01E-02	0,00E+00	-9,03E-01	0,00E+00	4,25E-01
Koksgas ²⁾	-1,67E-02	1,03E-01	-2,72E-02	0,00E+00	-4,91E-01	4,25E-01	0,00E+00
¹⁾ Bedarf	²⁾ Erzeugung						

Tabelle C.31: Massenbilanz für den Einzelprozeß Kokserzeugung.

Eingang [kg]	$\langle x \rangle$	m
Energieträger	1,83E+00	2,34E-01
Luft ¹⁾	(b) 2,46E+00	(b) 8,28E-02
Σ	4,29E+00	2,48E-01
Ausgang [kg]	$\langle x \rangle$	m
Produkt	1,00E+00	0,00E+00
Energieträger ³⁾	1,82E-01	4,63E-03
Abgas ²⁾	(b) 3,13E+00	(b) 1,36E-01
Material	-5,77E-02	3,65E-03
Σ	4,25E+00	1,36E-01
¹⁾ stöchiometrisch aus Energieträgerbedarf		
²⁾ stöchiometrisch aus CO ₂ -Emissionen		
³⁾ ohne Koks		

Tabelle C.32: Prozeßspezifische Daten für den Einzelprozeß Oxygenstahlerzeugung (Teil 1). Die Angaben beziehen sich auf 1 kg Rohstahl.

	<x>	m	s	n	Habersatter	Frischknecht ¹⁾	Merten	Wagner ¹⁾	Schaefer	Jahrbuch 93	VDEH
Energieträger	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg		MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg
Strom St.Ind. ¹⁾	1,04E-01	6,06E-03	1,60E-02	7	9,00E-02	1,28E-01	(u) 9,72E-02	9,00E-02	-	-	-
Steinkohle	4,67E-03	4,67E-03	8,08E-03	3	0,00E+00	0,00E+00	-	1,40E-02	-	-	-
Erdgas	1,22E-01	7,04E-02	1,22E-01	3	0,00E+00	2,44E-01	-	1,21E-01	-	-	-
Öl S	1,10E-02	1,10E-02	1,91E-02	3	0,00E+00	0,00E+00	-	3,30E-02	-	-	-
Dampf	1,60E-02	1,60E-02	2,77E-02	3	0,00E+00	0,00E+00	-	4,80E-02	-	-	-
Konvertergas	-6,80E-01	1,53E-01	3,43E-01	5	-6,00E-01	(b) -7,00E-01	(u) -1,18E+00	-2,19E-01	-	-	-
thermisch	-5,95E-01	2,22E-01	4,45E-01	4	-6,00E-01	-4,56E-01	-1,08E+00	-2,90E-03	-	-	-
Materialbedarf	kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg
Bauxit	1,06E-02	5,28E-03	5,28E-03	1	-	-	-	1,06E-02	-	-	-
Brannkalk	6,83E-02	6,51E-03	1,30E-02	4	-	7,50E-02	5,00E-02	7,97E-02	-	6,87E-02	-
Eisenerz	2,18E-02	1,88E-02	3,26E-02	3	-	-	-	5,95E-02	-	2,90E-03	-
Kalkstein	5,00E-03	2,50E-03	2,50E-03	1	-	5,00E-03	-	-	-	-	-
Legierungen	5,00E-03	2,50E-03	2,50E-03	1	-	-	-	-	-	-	-
Roheisen	8,88E-01	2,46E-02	6,51E-02	7	8,63E-01	(n) 1,00E+00	9,61E-01	(n) 1,08E+00	7,64E-01	9,11E-01	-
Rohstahl	-1,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1	-	-	-	-	-	-	-
Sauerstoff	8,40E-02	1,09E-02	2,44E-02	5	-	(n) 9,00E-05	8,10E-02	7,39E-02	-	1,27E-01	-
Schrott	2,04E-01	1,56E-02	4,41E-02	8	1,62E-01	(n) 0,00E+00	1,72E-01	(n) 0,00E+00	3,06E-01	2,01E-01	1,94E-01
Zuschläge	2,02E-02	1,65E-02	2,86E-02	3	7,43E-03	-	-	-	2,12E-04	-	-
Ausbruch	-1,60E-02	3,00E-03	3,00E-03	2	-	-	-	-	-	-	-
Auswurf	-1,44E-02	7,20E-03	7,20E-03	1	-	-	-	-1,44E-02	-	-	-
Schlacke	-1,19E-01	1,00E-02	2,45E-02	6	-8,16E-02	-	-1,26E-01	-1,44E-01	-1,43E-01	-	-
Stäube	-3,17E-02	1,28E-02	2,21E-02	3	-	-	-	-	-	-	-
Em. in Luft	kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg
C2F6	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-
CF4	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-
CH4	1,00E-05	5,00E-06	5,00E-06	1	-	-	-	-	-	-	-
CO	1,13E-02	2,50E-04	3,54E-04	2	-	-	-	-	-	-	-
CO2	1,24E-01	2,79E-02	6,24E-02	5	1,09E-01	-	2,15E-01	3,99E-02	-	-	-
HCl	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-
HF	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-
N2O	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-
NH3	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-
NM VOC	1,70E-04	8,50E-05	8,50E-05	1	-	-	-	-	-	-	-
NOx	8,00E-05	4,00E-05	4,00E-05	1	-	(n) 5,00E-05	-	-	-	-	-
SO2	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-
Wasserdampf	3,40E-01	1,70E-01	1,70E-01	1	-	-	3,40E-01	-	-	-	-
Staub	1,48E-04	5,65E-05	9,78E-05	3	2,30E-04	4,00E-05	(n) 3,10E-02	-	-	-	-
Abwasser	kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg
	7,00E-02	3,50E-02	3,50E-02	1	-	-	7,00E-02	-	-	-	-

Keine Allokationen.

¹⁾Strom stammt in Stahlindustrie anteilig aus Eigenerzeugung, hier: verknüpft mit Modul UCPT.

Tabelle C.33: Prozeßspezifische Daten für den Einzelprozeß Oxygenstahlerzeugung (Teil 2). Die Angaben beziehen sich auf 1 kg Rohstahl.

	Aichinger ²⁾	Penkuhn		Knop	UBA 5/96		Kugeler	SRU 250	Gemis 2.1	Gemis 3.0
Energieträger	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg
Strom St.Ind. ¹⁾	(u) 9,88E-02	-	-	-	-	-	(u) 1,26E-01	-	(u) 1,00E-01	-
Steinkohle	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Erdgas	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Öl S	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Dampf	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Konvertergas	(n) -7,00E-01	-	-	(u) -7,00E-01	-	-	-	-	-	-
thermisch	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Materialbedarf	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg
Bauxit	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Brannkalk	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Eisenerz	-	-	-	-	3,00E-03	-	-	-	-	-
Kalkstein	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Legierungen	-	-	-	-	5,00E-03	-	-	-	-	-
Roheisen	-	-	-	8,77E-01	8,90E-01	-	-	9,46E-01	-	-
Rohstahl	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sauerstoff	-	-	-	7,15E-02	6,72E-02	-	-	-	-	-
Schrott	-	-	-	2,00E-01	2,12E-01	-	-	1,86E-01	-	-
Zuschläge	-	-	-	-	5,30E-02	-	-	-	-	-
Ausbruch	-	-	-	-	[-2,20E-02;-1,00E-01]	-	-	-	-	-
Auswurf	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Schlacke	-	-	-	-	-1,20E-01	-	-	-1,00E-01	-	-
Stäube	-	(n) -9,00E-03	(n) -1,50E-02	-	[-2,40E-02;-1,40E-02]	-	-	-5,71E-02	-	-
Em. in Luft	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg
C2F6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CF4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CH4	-	-	-	-	-	-	-	-	1,00E-05	-
CO	-	-	-	-	-	-	-	-	1,10E-02	1,15E-02
CO2	1,27E-01	-	-	1,27E-01	-	-	-	-	-	-
HCl	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
HF	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
N2O	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NH3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NMVOC	-	-	-	-	-	-	-	-	1,70E-04	-
NOx	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8,00E-05
SO2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Wasserdampf	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Staub	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,75E-04
Abwasser	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg
Abwasser	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

²⁾ Schätzwerte nicht berücksichtigt.

Tabelle C.34: Kovarianzen der Energieträger bei der Oxygenstahlerzeugung.

s _{xy} /n	Strom St.Ind.	Steinkohle	Erdgas	Öl S	Dampf	Konvertergas
Strom St.Ind.	0,00E+00	-2,96E-05	7,75E-04	-6,97E-05	-1,01E-04	-1,23E-03
Steinkohle	-2,96E-05	0,00E+00	-1,56E-06	5,13E-05	7,47E-05	6,71E-04
Erdgas	7,75E-04	-1,56E-06	0,00E+00	-3,67E-06	-5,33E-06	-2,08E-03
Öl S	-6,97E-05	5,13E-05	-3,67E-06	0,00E+00	1,76E-04	1,58E-03
Dampf	-1,01E-04	7,47E-05	-5,33E-06	1,76E-04	0,00E+00	2,30E-03
Konvertergas	-1,23E-03	6,71E-04	-2,08E-03	1,58E-03	2,30E-03	0,00E+00

Tabelle C.35: Massenbilanz für den Einzelprozeß Oxygenstahlerzeugung.

Eingang [kg]	<x>	m
Energieträger ²⁾	8,45E-03	5,31E-03
Luft ¹⁾	(b) 2,41E-02	(b) 1,18E-02
Material	1,31E+00	4,10E-02
Σ	1,34E+00	4,30E-02
Ausgang [kg]	<x>	m
Produkt	1,00E+00	0,00E+00
Energieträger ²⁾	1,06E-01	2,33E-02
Abgas ¹⁾	(b) 2,74E-02	(b) 1,35E-02
Material	1,81E-01	1,80E-02
Em. in Luft	0,00E+00	1,72E-01
Abwasser	7,00E-02	3,50E-02
Σ	1,31E+00	1,72E-01

¹⁾stöchiometrisch aus Verbrennung von Energieträgern
²⁾inklusive Dampf

Tabelle C.36: Prozeßspezifische Daten für den Einzelprozeß Strangguß.
Die Angaben beziehen sich auf 1 kg Vorbrammen.

	<x>	m	s	n	Habersatter	Merten	Spittel	Aichinger	Wagner	Degner
Energieträger	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg		MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg
Strom St.Ind. ¹⁾	6,08E-02	1,39E-02	2,77E-02	4	1,01E-01	(u) 5,76E-02	(u) 3,96E-02	(u) 4,50E-02	-	-
Steinkohle	1,42E-01	7,12E-02	7,12E-02	1	1,42E-01	-	-	-	-	-
thermisch	1,16E-01	1,34E-02	2,32E-02	3	1,42E-01	1,04E-01	1,01E-01	-	-	-
Materialbedarf	kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg
Rohstahl	1,04E+00	3,55E-03	7,11E-03	4	1,03E+00	1,04E+00	-	-	1,04E+00	1,03E+00
Schrott	-3,59E-02	3,55E-03	7,11E-03	4	-2,83E-02	-4,20E-02	-	-	-4,20E-02	-3,15E-02
Vorbrammen	-1,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1	-	-	-	-	-	-
Em. in Luft	kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg
C2F6	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-
CF4	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-
CH4	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-
CO	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-
CO2	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-
HCl	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-
HF	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-
N2O	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-
NH3	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-
NMVOC	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-
NOx	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-
SO2	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-
Staub	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-

¹⁾Strom stammt in Stahlindustrie anteilig aus Eigenerzeugung, hier: verknüpft mit Modul UCPTe.

Tabelle C.37: Massenbilanz für den Einzelprozeß Strangguß.

Eingang [kg]	<x>	m
Energieträger	4,88E-03	2,44E-03
Luft ¹⁾	(b) 3,88E-02	(b) 1,94E-02
Material	1,04E+00	3,55E-03
Σ	1,08E+00	1,99E-02
Ausgang [kg]	<x>	m
Produkt	1,00E+00	0,00E+00
Abgas ¹⁾	(b) 4,24E-02	(b) 2,12E-02
Material	3,59E-02	3,55E-03
Σ	1,08E+00	2,15E-02

¹⁾stöchiometrisch aus Energieträgerbedarf

Tabelle C.38: Prozeßspezifische Daten für den Einzelprozeß Warmwalzen. Die Angaben beziehen sich auf 1 kg Warmband.

Energieträger	<x> MJ/kg	m MJ/kg	s MJ/kg	n	Habersatter MJ/kg	Merten MJ/kg	Reynolds MJ/kg	BUWAL 250 MJ/kg	UBA 5/96 MJ/kg	Gemis 3.0 MJ/kg
Strom St.Ind. ¹⁾	2,88E-01	1,15E-02	2,30E-02	4	3,02E-01	(u) 3,06E-01	(u) 2,56E-01	-	-	2,88E-01
Steinkohle	3,64E-01	3,64E-01	5,14E-01	2	7,28E-01	-	-	-	-	0,00E+00
Erdgas	4,60E-01	4,60E-01	6,51E-01	2	0,00E+00	-	-	-	-	9,20E-01
Öl S	3,65E-01	3,65E-01	5,17E-01	2	7,31E-01	-	-	-	-	0,00E+00
thermisch	1,12E+00	1,19E-01	2,51E-01	5	7,31E-01	(u) 1,28E+00	(u) [6,26E-01; 1,33E+00] ¹⁾	-	-	9,20E-01
Materialbedarf	kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg
Schrott	-3,05E-02	8,52E-03	1,63E-02	5	-2,91E-02	-2,80E-02	-	-1,08E-02	[-8,17E-02; -3,09E-03]	-
Vorbrammen	1,05E+00	1,80E-02	3,70E-02	5	1,03E+00	1,03E+00	-	1,02E+00	[1,02E+00; 1,15E+00]	-
Warmband	-1,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1	-	-	-	-	-	-
Walzzunder	-2,11E-02	1,10E-02	2,39E-02	5	0,00E+00	0,00E+00	-	-1,44E-02	[-7,04E-02; -2,06E-02]	-
Schlamm ²⁾	-1,05E-02	3,07E-03	4,27E-03	3	-	-	-	-7,20E-03	[-2,11E-02; -3,09E-03]	-
Em. in Luft	kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg
C2F6	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-
CF4	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-
CH4	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-
CO	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-
CO2	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-
HCl	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-
HF	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-
N2O	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-
NH3	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-
NM VOC	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-
NOx	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-
SO2	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-
Staub	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-

¹⁾ Strom stammt in Stahlindustrie anteilig aus Eigenerzeugung, hier: verknüpft mit Modul UCPTB. ²⁾ Walzzunderschlamm

³⁾ Max.: Kalt-, Min: Heißeinsatz

Tabelle C.39: Kovarianzen der Energieträger beim Warmwalzen.

s _{xy} /n	Strom St.Ind.	Steinkohle	Erdgas	Öl S
Strom St.Ind.	0,00E+00	2,62E-03	-3,31E-03	2,63E-03
Steinkohle	2,62E-03	0,00E+00	-1,67E-01	1,33E-01
Erdgas	-3,31E-03	-1,67E-01	0,00E+00	-1,68E-01
Öl S	2,63E-03	1,33E-01	-1,68E-01	0,00E+00

Tabelle C.40: Massenbilanz für den Einzelprozeß Warmwalzen.

Eingang [kg]	<x>	m
Energieträger	3,28E-02	1,91E-02
Luft ¹⁾	(b) 2,87E-01	(b) 1,69E-01
Material	1,05E+00	1,80E-02
Σ	1,38E+00	1,71E-01
Ausgang [kg]	<x>	m
Produkt	1,00E+00	0,00E+00
Abgas ¹⁾	(b) 3,17E-01	(b) 1,85E-01
Material	6,21E-02	1,43E-02
Σ	1,38E+00	1,86E-01

¹⁾ stöchiometrisch aus Energieträgerbedarf

Tabelle C.41: Prozeßspezifische Daten für den Einzelprozeß Kaltwalzen.
Die Angaben beziehen sich auf 1 kg Kaltband.

	<x>	m	s	n	Habersatter	Merten	Philipp	Wagner	SRU 250	UBA 5/96	Gemis 3.0
Energieträger	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg		MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg
Strom St.Ind. ¹⁾	5,54E-01	6,75E-02	1,25E-01	4	7,20E-01	-	-	[3,02E-01; 6,62E-01]	-	-	(a) 5,30E-01
Erdgas	7,70E-01	3,93E-02	4,85E-02	3	7,80E-01	-	-	[6,30E-01; 9,00E-01]	-	-	-
Öl S	2,84E-01	2,84E-01	4,91E-01	3	8,51E-01	-	-	0,00E+00 0,00E+00	-	-	-
Dampf	5,43E-01	2,82E-01	4,80E-01	3	0,00E+00	-	-	[5,50E-01; 1,08E+00]	-	-	-
thermisch	1,42E+00	1,93E-01	3,68E-01	4	1,63E+00	-	-	[1,18E+00; 1,98E+00]	-	-	9,00E-01
Materialbedarf	kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg
H2SO4	3,33E-02	1,83E-02	3,13E-02	3	-	6,90E-02	-	-	-	[1,00E-03; 3,00E-02]	-
Kalkstein	2,60E-02	1,30E-02	1,30E-02	1	-	2,60E-02	-	-	-	-	-
Schrott	-1,02E-01	2,54E-02	5,89E-02	6	-3,41E-02	-1,58E-01	-4,97E-02	-	-7,55E-02	[-2,36E-01; -6,00E-02]	-
Stahlblech	-1,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1	-	-	-	-	-	-	-
Walzöl	1,38E-03	4,40E-04	7,62E-04	3	-	5,00E-04	-	-	-	1,80E-03 1,84E-03	-
Warmband	1,10E+00	2,54E-02	5,89E-02	6	1,03E+00	1,16E+00	1,05E+00	-	1,08E+00	[1,06E+00; 1,24E+00]	-
Em. in Luft	kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg
C2F6	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-
CF4	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-
CH4	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-
CO	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-
CO2	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-
HCl	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-
HF	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-
N2O	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-
NH3	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-
NM VOC	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-
NOx	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-
SO2	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-
Staub	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-

¹⁾Strom stammt in Stahlindustrie anteilig aus Eigenerzeugung, hier: verknüpft mit Modul UCPTe.

Tabelle C.42: Massenbilanz für den Einzelprozeß Kaltwalzen.

Eingang [kg]	<x>	m
Energieträger	1,96E-01	8,85E-02
Luft ^{b)}	(b) 2,12E-01	(b) 8,98E-02
Material	1,16E+00	3,39E-02
Σ	1,57E+00	1,31E-01
Ausgang [kg]	<x>	m
Produkt	1,00E+00	0,00E+00
Abgas ^{b)}	(b) 2,37E-01	(b) 9,68E-02
Material	1,02E-01	2,54E-02
Dampf	1,70E-01	8,82E-02
Abfall	7,74E-03	3,87E-03
Σ	1,52E+00	1,33E-01

^{b)}stöchiometrisch aus Energieträgerbedarf

Tabelle C.43: Prozeßspezifische Daten für den Einzelprozeß Stanzen und Pressen. Die Angaben beziehen sich auf 1 kg gepreßtes Stahlblech.

	<x>	m	s	n	ISI ¹⁾	IFE/FFE ²⁾	Franz	Schweimer ²⁾	Eyerer ¹⁾		Philipp 96 ²⁾	Behr	
Energieträger	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg		MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg
Strom UCPTE	8,89E-01	2,39E-01	4,72E-01	4	1,21E+00	1,35E+00	-	6,67E-01	-	-	3,24E-01	-	-
Materialbedarf	kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg
Schrott	-3,95E-01	3,42E-02	8,87E-02	7	-4,50E-01	-4,18E-01	-2,00E-01	-	[-4,75E-01; -3,75E-01]	-	-	-3,50E-01	-5,00E-01
Stahlblech	1,40E+00	3,42E-02	8,87E-02	7	1,45E+00	1,42E+00	1,20E+00	-	[1,38E+00; 1,48E+00]	-	-	1,35E+00	1,50E+00
Stahlblech gepr.	-1,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Em. in Luft	kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg
C2F6	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CF4	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CH4	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CO	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CO2	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
HCl	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
HF	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
N2O	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NH3	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NM VOC	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NOx	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SO2	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Staub	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-

¹⁾ Dortige Bereichsangaben als 1 σ -Umgebung interpretiert und in 2 σ -Umgebung umgerechnet.

²⁾ Aus Primärenergieangaben berechnet.

Tabelle C.44: Massenbilanz für den Einzelprozeß Stanzen und Pressen.

Eingang [kg]	<x>	m
Material	1,40E+00	1,40E+00
Σ	1,40E+00	1,40E+00
Ausgang [kg]	<x>	m
Produkt	1,00E+00	0,00E+00
Material	(b) 3,95E-01	(b) 3,42E-02
Σ	1,40E+00	3,42E-02

Tabelle C.45: Prozeßspezifische Daten für den Einzelprozeß Fügen einer Stahlkarosserie. Die Angaben beziehen sich auf 1 kg Rohkarosserie.

	<x>	m	s	n	ISI	IFE/FFE
Energieträger	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg		MJ/kg	MJ/kg
Strom UCPTE	1,25E+00	4,37E-03	6,18E-03	2	1,25E+00	1,26E+00
Materialbedarf	kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg
Karosserie ¹⁾	-1,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1	-	-
Stahlblech gepr.	1,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1	-	-
Em. in Luft	kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg
C2F6	-	-	-	0	-	-
CF4	-	-	-	0	-	-
CH4	-	-	-	0	-	-
CO	-	-	-	0	-	-
CO2	-	-	-	0	-	-
HCl	-	-	-	0	-	-
HF	-	-	-	0	-	-
N2O	-	-	-	0	-	-
NH3	-	-	-	0	-	-
NM VOC	-	-	-	0	-	-
NOx	-	-	-	0	-	-
SO2	-	-	-	0	-	-
Staub	-	-	-	0	-	-

¹⁾ Stahlrohkarosserie

Tabelle C.46: Massenbilanz für den Einzelprozeß Fügen einer Stahlkarosserie.

Eingang [kg]	<x>	m
Material	1,00E+00	0,00E+00
Σ	1,00E+00	0,00E+00
Ausgang [kg]	<x>	m
Produkt	1,00E+00	0,00E+00
Σ	1,00E+00	0,00E+00

Tabelle C.47: Spezifische Daten für die Teilprozeßkette Blechherstellung. Die Teilprozeßkette umfaßt die Einzelprozesse Strangguß, Warmwalzen und Kaltwalzen. Alle Angaben beziehen sich auf 1 kg Stahlblech.

	<x>	m	s	n	Wagner	Jahrbuch 93	Aichinger	Mauch	Peckuhn		JKARUS		
Energieträger	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg		MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg
Strom St.Ind. ¹⁾	6,31E-01	4,56E-02	6,49E-02	4	7,01E-01	-	-	-	-	-	<6,08E-01>	[5,38E-01; 7,19E-01]	-
Erdgas	1,50E+00	4,18E-01	5,91E-01	2	1,92E+00	-	-	-	-	-	(u) 1,09E+00	-	-
Öl S	8,70E-02	2,70E-02	3,82E-02	2	1,14E-01	-	-	-	-	-	(u) 6,00E-02	-	-
Dampf	1,94E-01	2,96E-02	4,18E-02	2	2,24E-01	-	-	-	-	-	(u) 1,65E-01	-	-
Gichtgas	1,70E-01	1,70E-01	2,40E-01	2	0,00E+00	-	-	-	-	-	(u) 3,40E-01	-	-
Koksgas	5,48E-01	5,48E-01	7,74E-01	2	0,00E+00	-	-	-	-	-	(u) 1,10E+00	-	-
thermisch	2,50E+00	2,43E-01	3,44E-01	2	2,26E+00	-	-	-	-	-	2,74E+00	-	-
Materialbedarf	kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg
Roßstahl	1,10E+00	4,05E-03	7,01E-03	3	-	1,10E+00	1,11E+00	1,10E+00	-	-	-	-	-
Schrott	4,69E-02	5,41E-02	1,08E-01	4	-	-1,00E-01	-1,10E-01	-9,25E-02	1,15E-01	-	-	-	-
Stahlblech	-1,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Walzsander	-3,25E-02	8,75E-03	8,75E-03	2	-	-	-	-	[-3,25E-02; -1,50E-02]	-	-	-	-
Schlamm ²⁾	-6,25E-03	1,88E-03	1,88E-03	2	-	-	-	-	[-6,25E-03; -2,50E-03]	-	-	-	-
Em. in Luft	kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg
C2F6	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CF4	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CH4	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CO	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CO2	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
HCl	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
HF	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
N2O	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NH3	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NMVOC	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NOx	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SO2	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Staub	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-

¹⁾Strom stammt in Stahlindustrie anteilig aus Eigenzeugung, hier: verknüpft mit Modul UCPTB. ²⁾Walzsanderschlamm

Tabelle C.48: Massenbilanz für den Teilprozeßkette Blechherstellung.

Eingang [kg]	<x>	m
Energieträger ²⁾	1,80E-01	6,98E-02
Luft ¹⁾	(b) 5,84E-01	(b) 3,00E-01
Material	1,10E+00	4,05E-03
Σ	1,87E+00	3,08E-01
Ausgang [kg]	<x>	m
Produkt	1,00E+00	0,00E+00
Abgas ¹⁾	(b) 7,36E-01	(b) 3,35E-01
Dampf	(b) 6,08E-02	(b) 9,24E-03
Material	8,56E-02	5,48E-02
Σ	1,88E+00	3,40E-01

¹⁾stöchiometrisch aus Verbrennung von Energieträgern
²⁾inklusive Dampf

Tabelle C.49: Spezifische Daten für die Teilprozeßkette Stahlblecherzeugung. Die Teilprozeßkette umfaßt die Einzelprozesse Sintern, Hochofen, Kokserzeugung, Oxygenstahlerzeugung, Strangguß, Warmwalzen und Kaltwalzen sowie die Teilprozeßkette Blechherstellung. Alle Angaben beziehen sich auf 1 kg Stahlblech.

	<x>	m	s	n	Philipp	ohne Verbr. ⁴⁾	SRU 250
Energieträger	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg		MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg
Strom St.Ind. ¹⁾	1,05E+00	1,46E-02	2,06E-02	2	1,04E+00	-	1,07E+00
Steinkohle (p)	1,91E+01	3,05E-01	4,31E-01	2	1,88E+01	-	1,94E+01
Erdgas	1,24E+00	1,06E+00	1,50E+00	2	1,83E-01	-	2,30E+00
Öl S (p)	2,67E-01	2,67E-01	3,77E-01	2	0,00E+00	-	5,33E-01
Dampf	4,93E-01	4,93E-01	6,97E-01	2	9,85E-01	-	0,00E+00
thermisch	2,11E+01	1,14E+00	1,61E+00	2	2,00E+01	-	2,23E+01
Materialbedarf	kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg
Brannkalk	7,06E-02	9,44E-03	1,34E-02	2	6,11E-02	-	8,00E-02
Eisenerz ²⁾	1,45E+00	3,96E-02	5,60E-02	2	1,41E+00	-	1,49E+00
(Pellets)	3,69E-01	7,22E-02	1,02E-01	2	4,41E-01	-	2,97E-01
H2SO4	8,30E-03	3,71E-03	5,24E-03	2	4,59E-03	-	1,20E-02
Kalkstein	1,13E-01	2,13E-03	3,01E-03	2	1,15E-01	-	1,11E-01
Legierungen	8,05E-03	2,85E-03	4,03E-03	2	1,09E-02	-	5,20E-03
Schrott	9,38E-02	2,82E-02	3,99E-02	2	6,55E-02	-	1,22E-01
Stahlblech	-1,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1	-	-	-
Walzöl	2,02E-03	1,80E-04	2,55E-04	2	1,84E-03	-	2,20E-03
Zuschläge	5,73E-02	2,43E-02	3,44E-02	2	8,16E-02	-	3,30E-02
Ausbruch	-2,00E-04	1,00E-04	1,00E-04	1	-2,00E-04	-	-
Auswurf	-7,77E-03	3,89E-03	3,89E-03	1	-7,77E-03	-	-
Rohbenzol	-1,97E-03	1,64E-03	2,31E-03	2	-3,30E-04	-	-3,60E-03
Rohteer	-1,25E-02	1,47E-03	2,07E-03	2	-1,39E-02	-	-1,10E-02
Schlacke	-3,73E-01	1,35E-02	1,91E-02	2	-3,59E-01	-	-3,86E-01
Stäube	-4,97E-02	1,23E-02	1,73E-02	2	-3,75E-02	-	-6,20E-02
Walzzunder	-2,48E-02	3,19E-03	4,51E-03	2	-2,16E-02	-	-2,80E-02
Schlamm ³⁾	-4,41E-03	9,00E-05	1,27E-04	2	-4,32E-03	-	-4,50E-03
Em. in Luft	kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg
C2F6	-	-	-	0	-	-	-
CF4	-	-	-	0	-	-	-
CH4	4,70E-06	3,83E-06	5,42E-06	2	(n) 8,90E-06	(b) 8,53E-06	8,70E-07
CO	1,92E-02	3,35E-03	4,74E-03	2	(n) 2,25E-02	(b) 2,25E-02	1,58E-02
CO2	1,86E+00	1,53E-01	2,17E-01	2	(n) 1,71E+00	(b) 1,70E+00	2,01E+00
HCl	3,20E-05	6,95E-06	9,83E-06	2	(n) 3,89E-05	(b) 3,89E-05	2,50E-05
HF	3,70E-06	1,10E-06	1,56E-06	2	(n) 2,60E-06	(b) 2,60E-06	4,80E-06
N2O	-	-	-	0	-	-	-
NH3	3,15E-07	1,50E-08	2,12E-08	2	(n) 3,00E-07	(b) 3,00E-07	3,30E-07
NM VOC	9,36E-06	4,68E-06	4,68E-06	1	(n) 9,88E-06	(b) 9,36E-06	-
NOx	1,56E-03	1,62E-04	2,29E-04	2	(n) 1,73E-03	(b) 1,72E-03	1,40E-03
SO2	1,68E-03	2,85E-04	4,03E-04	2	(n) 1,97E-03	(b) 1,97E-03	1,40E-03
Staub	5,02E-04	8,34E-06	1,18E-05	2	(n) 5,11E-04	(b) 5,11E-04	4,94E-04

¹⁾ Strom stammt in Stahlindustrie anteilig aus Eigenerzeugung, hier: verknüpft mit Modul UCPTe.
²⁾ inklusive Erzanteil in Pellets ³⁾ Walzzunderschlamm ⁴⁾ Verbrennungsabgase des Erdgases
rechnerisch entfernt. Die Korrekturen sind klein, die Näherung daher ausreichen genau.

Tabelle C.50: Kovarianzen der Energieträger bei der Teilprozeßkette Stahlblecherzeugung.

s_{xy}/n	Strom St.Ind.	Steinkohle	Erdgas	Öl S	Dampf
Strom St.Ind.	0,00E+00	4,45E-03	1,54E-02	3,89E-03	-7,19E-03
Steinkohle	4,45E-03	0,00E+00	3,22E-01	8,13E-02	-1,50E-01
Erdgas	1,54E-02	3,22E-01	0,00E+00	2,82E-01	-5,21E-01
Öl S	3,89E-03	8,13E-02	2,82E-01	0,00E+00	-1,31E-01
Dampf	-7,19E-03	-1,50E-01	-5,21E-01	-1,31E-01	0,00E+00

Tabelle C.51: Massenbilanz für die Teilprozeßkette Stahlblecherzeugung.

Eingang [kg]	$\langle x \rangle$	m
Energieträger	8,46E-01	1,57E-01
Luft ¹⁾	(b) 5,48E+00	(b) 2,06E-01
Material	2,18E+00	9,12E-02
Σ	8,51E+00	2,74E-01
Ausgang [kg]	$\langle x \rangle$	m
Produkt	1,00E+00	0,00E+00
Material	4,74E-01	1,90E-02
Dampf	1,54E-01	1,54E-01
Abgas ²⁾	(b) 8,35E+00	(b) 6,89E-01
Σ	9,98E+00	7,06E-01
¹⁾ stöchiometrisch aus Verbrennung von Energieträgern		
²⁾ inklusive Dampf		

Prozeßspezifische Daten zum Shreddern von Stahlkarosserien finden sich in Tabelle 4.15.

Tabelle C.52: Massenbilanz für den Einzelprozeß Shreddern einer Stahlkarosserie.

Eingang [kg]	$\langle x \rangle$	m
Energieträger	2,66E-04	1,33E-04
Luft ¹⁾	(b) 3,45E-03	(b) 1,72E-03
Material	1,11E+00	5,56E-01
Σ	1,11E+00	5,56E-01
Ausgang [kg]	$\langle x \rangle$	m
Produkt	1,00E+00	0,00E+00
Abgas ¹⁾	(b) 3,72E-03	(b) 1,86E-03
Abfall	1,11E-01	5,56E-02
Σ	1,11E+00	5,56E-02
¹⁾ stöchiometrisch aus Energieträgerbedarf		

Prozeßspezifische Daten der Elektrostahlherstellung finden sich in Tabelle 4.16.

Tabelle C.53: Massenbilanz für den Einzelprozeß Elektrostahlerzeugung.

Eingang [kg]	<x>	m
Energieträger	9,65E-02	3,78E-03
Luft ¹⁾	(b) 7,87E-01	(b) 3,05E-02
Material	1,27E+00	5,10E-02
Σ	2,15E+00	5,95E-02
Ausgang [kg]	<x>	m
Produkt	1,00E+00	0,00E+00
Material	9,96E-02	1,63E-02
Abgas ¹⁾	(b) 8,59E-01	(b) 3,33E-02
Asche	(b) 7,83E-03	(b) 3,18E-04
Em. in Luft	(b) 1,28E-01	(b) 5,26E-02
Abfall	1,99E-03	9,97E-04
Σ	2,10E+00	6,43E-02

¹⁾stöchiometrisch aus Energieträgerbedarf

Tabelle C.54: Prozeßspezifische Daten für den Einzelprozeß Elektrodenherstellung. Die Angaben beziehen sich auf 1 kg Elektrode für den Elektrolichtbogenofen.

	<x>	m	s	n	Habersatter
Energieträger	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg		MJ/kg
Strom UCPT	6,12E-01	3,06E-01	3,06E-01	1	6,12E-01
Steinkohle	1,37E+00	6,86E-01	6,86E-01	1	1,37E+00
Erdgas	3,95E+00	1,97E+00	1,97E+00	1	3,95E+00
thermisch	5,32E+00	2,66E+00	2,66E+00	1	5,32E+00
Materialbedarf	kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg
Anode	-1,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1	-
Pech	2,00E-01	1,00E-01	1,00E-01	1	2,00E-01
Petrolkoks	8,00E-01	4,00E-01	4,00E-01	1	8,00E-01
Em. in Luft	kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg
C2F6	-	-	-	0	-
CF4	-	-	-	0	-
CH4	-	-	-	0	-
CO	-	-	-	0	-
CO2	-	-	-	0	-
HCl	-	-	-	0	-
HF	-	-	-	0	-
N2O	-	-	-	0	-
NH3	-	-	-	0	-
NMVOC	-	-	-	0	-
NOx	-	-	-	0	-
SO2	7,50E-04	3,75E-04	3,75E-04	1	7,50E-04
Staub	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1	0,00E+00

Tabelle C.55: Massenbilanz für den Einzelprozeß Elektrodenherstellung.

Eingang [kg]	<x>	m ²⁾
Energieträger	1,45E-01	5,43E-02
Luft ¹⁾	(b) 1,00E+00	(b) 3,65E-01
Material	1,00E+00	4,12E-01
Σ	2,15E+00	5,53E-01
Ausgang [kg]	<x>	m ²⁾
Produkt	1,00E+00	0,00E+00
Abgas ¹⁾	(b) 1,13E+00	(b) 4,15E-01
Asche	3,98E-03	1,99E-03
Σ	2,13E+00	4,15E-01

¹⁾stöchiometrisch aus Energieträgerbedarf

²⁾Geschätzt, da n=1.

C.2 Aluminiumkarosserie

Tabelle C.56: Prozeßspezifische Daten für den Einzelprozeß Bauxitabbau. Die Angaben beziehen sich auf 1 kg Bauxit.

	<x>	m	s	n	Habersatter	Schaefer			
Energieträger	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg		MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg
Strom int. ¹⁾	7,20E-03	3,60E-03	3,60E-03	1	7,20E-03	(n) 0,00E+00	-	-	-
Öl S	5,28E-01	2,64E-01	2,64E-01	1	5,28E-01	-	-	-	-
thermisch	6,14E-01	8,60E-02	1,22E-01	2	5,28E-01	7,00E-01	-	-	-
Materialbedarf	kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg
Bauxit	-1,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1	-	-	-	-	-
Em. in Luft	kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg
C2F6	-	-	-	0	-	-	-	-	-
CF4	-	-	-	0	-	-	-	-	-
CH4	-	-	-	0	-	-	-	-	-
CO	-	-	-	0	-	-	-	-	-
CO2	-	-	-	0	-	-	-	-	-
HCl	-	-	-	0	-	-	-	-	-
HF	-	-	-	0	-	-	-	-	-
N2O	-	-	-	0	-	-	-	-	-
NH3	-	-	-	0	-	-	-	-	-
NMVOC	-	-	-	0	-	-	-	-	-
NOx	-	-	-	0	-	-	-	-	-
SO2	-	-	-	0	-	-	-	-	-
Staub	-	-	-	0	-	-	-	-	-
	kg/kg	kg/kg	kg/kg		Rohn				
				Land	Australien	Guinea	Jamaika	Brasilien	Indien
				Förderung [1000t]	3,97E+04	1,38E+04	1,13E+04	9,37E+03	4,90E+03
Rohförderung	1,95E+00	8,43E-01	2,53E+00	10	1,20E+00	1,20E+00	1,05E+00	1,90E+00	1,20E+00
Abraum	9,48E-01	8,43E-01	2,53E+00	10	2,00E-01	2,00E-01	5,00E-02	9,00E-01	2,00E-01
				Land	Surinam	China	Guyana	Griechenland	Sierra Leone
				Förderung [1000t]	3,25E+03	2,70E+03	2,38E+03	2,04E+03	1,25E+03
Rohförderung					1,30E+00	7,60E+00	8,50E+00	1,50E+01	1,10E+00
Abraum					3,00E-01	6,60E+00	7,50E+00	1,40E+01	1,00E-01

¹⁾ Teilweise außereuropäische Bereitstellung, hier verknüpft mit Modul UCPTe.

Tabelle C.57: Massenbilanz für den Einzelprozeß Bauxitabbau.

Eingang [kg]	<x>	m
Energieträger	1,29E-02	6,43E-03
Luft ¹⁾	(b) 1,67E-01	(b) 8,34E-02
Material	1,95E+00	8,43E-01
Σ	2,13E+00	8,47E-01
Ausgang [kg]	<x>	m
Produkt	1,00E+00	0,00E+00
Abgas ¹⁾	(b) 1,80E-01	(b) 8,99E-02
Abraum	9,48E-01	8,43E-01
	2,13E+00	8,48E-01

¹⁾ stöchiometrisch aus Energieträgerbedarf

Tabelle C.58: Prozeßspezifische Daten für den Einzelprozeß Bayer-Prozeß. Die Angaben beziehen sich auf 1 kg Tonerde.

	<x>	m	s	n	Habersatter	Wagner	Schaefer	Mauch	Rohn	GDA
Energieträger	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg		MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg
Strom UCPT	1,60E+00	3,99E-01	7,98E-01	5	(n) 8,39E-01	(n) 7,41E-01	(n) 9,36E-01	-	(n) 8,39E-01	-
Steinkohle	6,60E-01	7,18E-01	1,44E+00	5	-	-	-	-	-	-
Erdgas	2,10E+00	8,84E-01	1,77E+00	5	-	-	-	-	-	-
Öl S	7,70E+00	1,15E+00	2,31E+00	5	(n) 8,65E+00	-	-	-	-	-
Öl EL	4,30E-02	2,60E-02	5,20E-02	5	-	-	-	-	-	-
thermisch	1,05E+01	6,58E-01	1,32E+00	5	(n) 8,65E+00	(n) 9,30E+00	(n) 8,50E+00	-	(n) 8,65E+00	-
Materialbedarf	kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg
Bauxit	2,15E+00	6,08E-02	1,78E-01	9	2,52E+00	2,27E+00	2,00E+00	2,05E+00	(n) 2,52E+00	-
Brannkalk	5,40E-02	6,26E-03	1,08E-02	3	4,60E-02	6,64E-02	-	-	(n) 4,60E-02	-
NaOH	1,39E-01	2,53E-02	6,18E-02	6	2,26E-01	(n) 1,08E-01	(n) 2,30E-02	2,11E-01	(n) 2,26E-01	-
Tonerde	-1,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1	-	-	-	-	-	-
Wasser	5,00E+00	2,50E+00	2,50E+00	1	5,00E+00	-	-	-	(n) 5,00E+00	-
Em. in Luft	kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg
C2F6	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-
CF4	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-
CH4	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-
CO	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-
CO2	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-
HCl	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-
HF	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-
N2O	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-
NH3	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-
NMVOC	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-
NOx	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-
SO2	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-
Staub	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-
Abwasser	kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg
Abwasser	5,15E+00	2,57E+00	2,57E+00	1	5,15E+00	-	-	-	-	-
Rotschlamm	kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg
Rotschlamm	1,04E+00	7,42E-02	2,10E-01	8	1,26E+00	1,14E+00	1,00E+00	1,32E+00	1,26E+00	7,00E-01

Gewichtung nach Produktion/Import Westeuropa 1992 ¹⁾					3,00E-02	1,00E-02	3,20E-01	1,00E-01	5,40E-01
					IPA1				
					Africa & South Asia	North America	Latin America	East Asia & Oceania	Europe
Energieträger	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg
Strom UCPT	-	-	-	-	-	8,36E-01	6,30E-01	7,91E-01	5,72E-01
Steinkohle	-	-	-	-	-	7,06E+00	0,00E+00	4,42E-01	3,07E+00
Erdgas	-	-	-	-	-	7,72E-02	1,13E+01	1,98E+00	6,38E+00
Öl S	-	-	-	-	-	7,14E+00	4,45E-01	9,31E+00	1,47E+00
Öl EL	-	-	-	-	-	5,22E-02	6,01E-04	1,18E-01	8,17E-03
thermisch	-	-	-	-	-	1,43E+01	1,17E+01	1,19E+01	1,09E+01
Materialbedarf	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg
Bauxit	<2,12E+00>	[2,01E+00; 2,17E+00]	1,92E+00	2,25E+00	-	-	-	-	-
Brannkalk	-	-	4,97E-02	-	-	-	-	-	-
NaOH	<1,00E-01>	[9,00E-02; 1,10E-01]	9,58E-02	-	-	-	-	-	-
Tonerde	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Wasser	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Em. in Luft	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg
C2F6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CF4	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CH4	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CO	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CO2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
HCl	-	-	-	-	-	-	-	-	-
HF	-	-	-	-	-	-	-	-	-
N2O	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NH3	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NMVOC	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NOx	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SO2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Staub	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Abwasser	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg
Abwasser	8,30E-01	-	-	9,62E-01	1,13E+00	-	-	-	-

¹⁾ Abgeschätzt nach [116] für 1992.

Tabelle C.59: Kovarianzen der Energieträger im Bayer-Prozeß.

s_{xy}/n	Strom UCPTE	Steinkohle	Erdgas	Öl S	Öl EL
Strom UCPTE	0,00E+00	-1,46E-01	-3,13E-01	3,00E-01	-1,80E-03
Steinkohle	-1,46E-01	0,00E+00	-1,17E+00	1,59E-01	2,81E-03
Erdgas	-3,13E-01	-1,17E+00	0,00E+00	-3,35E+00	-2,35E-02
Öl S	3,00E-01	1,59E-01	-3,35E+00	0,00E+00	2,76E-02
Öl EL	-1,80E-03	2,81E-03	-2,35E-02	2,76E-02	0,00E+00

Tabelle C.60: Massenbilanz für den Bayer-Prozeß.

Eingang [kg]	$\langle x \rangle$	m
Energieträger	2,63E-01	4,33E-02
Luft ¹⁾	(b) 2,96E+00	(b) 4,37E-01
Material	7,35E+00	2,50E+00
Σ	1,06E+01	2,54E+00
Ausgang [kg]	$\langle x \rangle$	m
Produkt	1,00E+00	0,00E+00
Abgas ¹⁾	(b) 3,22E+00	(b) 4,76E-01
Abwasser	5,15E+00	(b) 2,57E+00
Rotschlamm	1,04E+00	7,42E-02
Σ	1,04E+01	2,62E+00
¹⁾ stöchiometrisch aus Energieträgerbedarf		

Tabelle C.61: Prozeßspezifische Daten für den Einzelprozeß Natronlaugeherstellung. Die Angaben beziehen sich auf 1 kg 50%ige Natronlauge.

	<x>	m	s	n	Habersatter	SRU 250 ¹⁾
Energieträger	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg		MJ/kg	MJ/kg
Strom UCPTB	4,77E+00	6,35E-01	8,98E-01	2	5,40E+00	4,13E+00
Steinkohle	2,88E-01	2,88E-01	4,07E-01	2	0,00E+00	5,75E-01
Erdgas	9,20E-01	9,20E-01	1,30E+00	2	0,00E+00	1,84E+00
Öl S	2,34E+00	1,76E+00	2,49E+00	2	4,10E+00	5,80E-01
thermisch	3,55E+00	5,50E-01	7,78E-01	2	4,10E+00	3,00E+00
Materialbedarf	kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg
Kalkstein	5,25E-03	2,63E-03	2,63E-03	1	-	5,25E-03
NaOH	-1,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1	-	-
Sand	1,00E-04	5,00E-05	5,00E-05	1	-	1,00E-04
Steinsalz	7,41E-01	1,01E-02	1,42E-02	2	7,31E-01	7,51E-01
Wasser	5,88E+00	2,73E+00	3,85E+00	2	8,60E+00	3,15E+00
Cl2	-4,49E-01	6,10E-03	8,63E-03	2	(b) -4,43E-01	(b) -4,55E-01
H2	-1,27E-02	1,72E-04	2,44E-04	2	(b) -1,25E-02	(b) -1,29E-02
Em. in Luft	kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg
C2F6	-	-	-	0	-	-
CF4	-	-	-	0	-	-
CH4	-	-	-	0	-	(n) 1,20E-03
CO	-	-	-	0	-	(n) 3,40E-04
CO2	-	-	-	0	-	(n) 5,50E-01
HCl	7,50E-05	3,75E-05	3,75E-05	1	-	7,50E-05
HF	-	-	-	0	-	-
N2O	-	-	-	0	-	(n) 2,75E-06
NH3	-	-	-	0	-	-
NMVOC	-	-	-	0	-	(n) 2,02E-03
NOx	-	-	-	0	-	(n) 3,50E-03
SO2	-	-	-	0	-	(n) 4,95E-03
Staub	1,54E-03	7,70E-04	7,70E-04	1	-	1,54E-03
Abwasser	kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg
Abwasser	5,15E+00	2,73E+00	3,86E+00	2	7,87E+00	2,42E+00

Keine Allokationen.

¹⁾ Emissionen aus Verbrennungen nicht berücksichtigt, werden durch eigenes Modell generiert.

Tabelle C.62: Kovarianzen der Energieträger bei der Natronlaugeherstellung.

s _{xy} /n	Strom UCPTB	Steinkohle	Erdgas	Öl S
Strom UCPTB	0,00E+00	-1,83E-01	-5,84E-01	1,12E+00
Steinkohle	-1,83E-01	0,00E+00	2,65E-01	-5,05E-01
Erdgas	-5,84E-01	2,65E-01	0,00E+00	-1,62E+00
Öl S	1,12E+00	-5,05E-01	-1,62E+00	0,00E+00

Tabelle C.63: Massenbilanz für den Einzelprozeß Natronlaugeherstellung.

Eingang [kg]	<x>	m
Energieträger	8,96E-02	4,95E-02
Luft ¹⁾	(b) 9,63E-01	(b) 5,80E-01
Material	6,62E+00	2,73E+00
Σ	7,67E+00	2,79E+00
Ausgang [kg]	<x>	m
Produkt	1,00E+00	0,00E+00
Abgas ¹⁾	(b) 1,05E+00	(b) 6,28E-01
Material	4,62E-01	6,11E-03
Abwasser	5,15E+00	2,73E+00
Σ	7,66E+00	2,73E+00

¹⁾ stöchiometrisch aus Energieträgerbedarf

Tabelle C.64: Prozessspezifische Daten für den Einzelprozeß Schmelzflußelektrolyse (Teil 1). Die Angaben beziehen sich auf 1 kg Primäraluminium.

Energieträger	<>	m	s	n	Habersatter	Wagner	Schaefer	Mauch	Rohn	Frisknecht
	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg		MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg
Strom Al-Ind. ¹⁾	5,40E+01	4,54E-01	4,81E+00	113	(n) 5,40E+01	(n) 6,05E+01	(n) 5,09E+01	-	(n) 5,40E+01	-
Öl S	3,00E+00	1,50E+00	1,50E+00	1	-	-	-	-	-	-
Öl EL	3,83E+00	1,91E+00	1,91E+00	1	3,83E+00	-	-	-	(n) 3,83E+00	-
Petrolkoks ²⁾ (p)	1,60E+01	2,66E-01	2,15E+00	65	1,48E+01	(n) 2,07E+01	(u) 1,41E+01	(u) 1,45E+01	-	-
thermisch	1,98E+01	2,71E-01	2,17E+00	64	1,87E+01	(n) 2,07E+01	1,79E+01	1,83E+01	(n) 3,83E+00	-
Materialbedarf	kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg
AlF ₃	2,33E-02	5,57E-03	1,11E-02	4	1,80E-02	4,00E-02	1,77E-02	-	-	-
Alu. primär	-1,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1	-	-	-	-	-	-
Anode ³⁾	4,63E-01	7,72E-03	6,22E-02	65	4,30E-01	(n) 5,99E-01	4,08E-01	4,20E-01	-	-
Luft ⁴⁾	1,43E+00	6,47E-02	1,29E-01	4	(b) 1,58E+00	-	(b) 1,28E+00	(b) 1,46E+00	(n) 1,43E+00	-
Tonerde	1,91E+00	4,47E-03	1,00E-02	5	1,90E+00	1,92E+00	1,92E+00	1,90E+00	-	-
Em. in Luft	kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg
Abluft o. CO ₂	1,07E+00	4,85E-02	9,70E-02	4	1,19E+00	2,68E+00	9,57E-01	1,10E+00	1,07E+00	-
C ₂ F ₆	1,65E-04	2,77E-05	4,80E-05	3	-	-	-	-	-	2,00E-04
CF ₄	7,21E-04	2,70E-04	5,40E-04	4	-	-	-	-	-	1,40E-03
CH ₄	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-
CO	9,64E-02	2,68E-02	6,00E-02	5	1,20E-02	-	-	-	-	-
CO ₂	1,60E+00	2,80E-02	2,28E-01	66	(b) 1,56E+00	(n) 2,10E+00	(b) 1,40E+00	(b) 1,44E+00	-	(n) 1,29E+00
HCl	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-
HF	1,17E-03	5,30E-04	1,22E-03	6	2,50E-04	-	-	-	-	-
N ₂ O	1,00E-05	5,00E-06	5,00E-06	1	-	-	-	-	-	-
NH ₃	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-
NM VOC	1,00E-04	5,00E-05	5,00E-05	1	-	-	-	-	-	-
NO _x	1,76E-03	1,26E-03	1,78E-03	2	3,01E-03	-	-	-	-	-
SO ₂	7,82E-03	2,37E-03	5,79E-03	6	7,70E-03	-	-	-	-	-
Staub	5,75E-03	2,97E-03	6,64E-03	5	1,36E-03	-	-	-	-	-

¹⁾ verknüpft mit Modell nach Abschnitt 4.2.5

²⁾ Energieinhalt Anoden

³⁾ Nettoverbrauch

	SRU 250	Al-Taschenbuch	Gemis 2.1	Gemis 3.0	Mjaset
Energieträger	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg
Strom Al-Ind. ¹⁾	-	(u,n) 5,04E+02	(u,n) 5,76E+02	(n) 5,40E+01	-
Öl S	-	-	-	(u) 3,00E+00	-
Öl EL	-	-	-	-	-
Petrolkoks ²⁾ (p)	(u) 1,43E+01	(u) 1,59E+01	-	(u) 1,48E+01	-
thermisch	1,81E+01	-	-	2,16E+01	-
Materialbedarf	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg
AlF ₃	1,75E-02	-	-	-	-
Alu. primär	-	-	-	-	-
Anode ³⁾	4,15E-01	4,60E-01	-	4,30E-01	-
Luft ⁴⁾	(b) 1,38E+00	-	-	-	-
Tonerde	1,91E+00	-	-	-	-
Em. in Luft	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg
Abluft o. CO ₂	1,04E+00	-	-	-	-
C ₂ F ₆	-	-	-	1,10E-04	-
CF ₄	-	-	-	7,50E-04	-
CH ₄	-	-	(n) 1,00E-05	-	-
CO	6,00E-02	-	1,50E-01	1,10E-01	1,50E-01
CO ₂	(b) 1,46E+00	(b) 1,59E+00	(b) 1,43E+00	1,40E+00	-
HCl	-	-	-	-	-
HF	-	-	1,30E-04	4,00E-05	2,50E-03
N ₂ O	-	-	1,00E-05	-	-
NH ₃	-	-	-	-	-
NM VOC	-	-	1,00E-04	-	-
NO _x	-	-	5,00E-04	-	-
SO ₂	-	-	6,00E-03	1,00E-02	1,80E-02
Staub	-	-	3,40E-03	-	1,75E-02

⁴⁾ Zur Oxidation der Anoden, zusätzlich zu Sauerstoff aus Tonerde.

⁵⁾ Wichtung aufgrund Jahresproduktionskapazität nach [Pawlek].

Tabelle C.65: Prozeßspezifische Daten für den Einzelprozeß Schmelzflußelektrolyse (Teil 2). Die Angaben beziehen sich auf 1 kg Primäraluminium.

Gewichtung ⁵⁾	6,00E+04	4,50E+04	2,15E+05	4,40E+04	1,25E+05	3,10E+04	1,20E+05	7,80E+04	1,40E+05	2,10E+05
	Pawlek									
Energieträger	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg
Strom Al-Ind. ¹⁾	(u) 6,30E+01	(u) 4,64E+01	(u) 4,82E+01	(u) 5,04E+01	(u) 4,84E+01	(u) 4,86E+01	(u) 5,15E+01	(u) 5,11E+01	(u) 5,11E+01	(u) 5,33E+01
Öl S	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Öl EL	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Petrolkoks ²⁾ (p)	(u) 1,79E+01	(u) 1,45E+01	(u) 1,41E+01	(u) 1,48E+01	(u) 1,52E+01	(u) 1,51E+01	(u) 1,43E+01	(u) 1,47E+01	(u) 1,41E+01	(u) 1,50E+01
thermisch	2,17E+01	1,83E+01	1,79E+01	1,86E+01	1,90E+01	1,89E+01	1,81E+01	1,85E+01	1,79E+01	1,88E+01
Materialbedarf	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg
AlF ₃	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alu. primär	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Anode ³⁾	5,18E-01	4,20E-01	4,10E-01	4,30E-01	4,40E-01	4,37E-01	4,15E-01	4,25E-01	4,09E-01	4,34E-01
Luft ⁴⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Tonerde	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Em. in Luft	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg
Abluft o. CO ₂	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
C ₂ F ₆	-	-	-	1,84E-04	-	-	-	-	-	-
CF ₄	-	-	8,30E-05	6,51E-04	-	-	-	-	-	-
CH ₄	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CO ₂	(b) 1,80E+00	(b) 1,44E+00	(b) 1,41E+00	(b) 1,48E+00	(b) 1,52E+00	(b) 1,51E+00	(b) 1,43E+00	(b) 1,46E+00	(b) 1,40E+00	(b) 1,49E+00
HCl	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
HF	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
N ₂ O	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NH ₃	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NMVOC	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NO _x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SO ₂	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Staub	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Gewichtung ⁵⁾	7,00E+04	6,10E+04	2,90E+04	9,30E+04	6,00E+04	3,50E+04	4,00E+04	1,40E+05	3,20E+04	9,80E+04
	Pawlek									
Energieträger	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg
Strom Al-Ind. ¹⁾	(u) 5,51E+01	(u) 4,90E+01	(u) 5,04E+01	(u) 4,77E+01	(u) 4,77E+01	(u) 5,14E+01	(u) 5,18E+01	(u) 5,36E+01	(u) 5,36E+01	(u) 5,33E+01
Petrolkoks ²⁾ (p)	(u) 1,48E+01	(u) 1,48E+01	(u) 1,47E+01	(u) 1,43E+01	(u) 1,50E+01	(u) 1,48E+01	(u) 1,45E+01	(u) 1,45E+01	(u) 1,45E+01	(u) 1,45E+01
thermisch	1,86E+01	1,86E+01	1,85E+01	1,81E+01	1,88E+01	1,86E+01	1,83E+01	1,83E+01	1,83E+01	1,83E+01
Materialbedarf	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg
Anode ³⁾	4,30E-01	4,30E-01	4,25E-01	4,15E-01	4,35E-01	4,30E-01	4,20E-01	4,20E-01	4,20E-01	4,20E-01
Em. in Luft	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg
CO ₂	(b) 1,48E+00	(b) 1,48E+00	(b) 1,46E+00	(b) 1,43E+00	(b) 1,50E+00	(b) 1,48E+00	(b) 1,44E+00	(b) 1,44E+00	(b) 1,44E+00	(b) 1,44E+00

Gewichtung ⁵⁾	1,75E+05	8,00E+04	5,00E+04	7,70E+04	5,00E+04	9,82E+04	4,08E+04	2,10E+04	5,00E+04	1,12E+05
	Pawlek									
Energieträger	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg
Strom Al-Ind. ¹⁾	(u) 4,82E+01	(u) 6,12E+01	(u) 6,44E+01	(u) 5,22E+01	(u) 5,69E+01	(u) 5,18E+01	(u) 5,00E+01	(u) 5,94E+01	(u) 4,82E+01	(u) 5,94E+01
Petrolkoks ²⁾ (p)	(u) 1,55E+01	(u) 1,49E+01	(u) 1,50E+01	(u) 1,44E+01	(u) 1,78E+01	(u) 1,73E+01	(u) 1,41E+01	(u) 1,79E+01	(u) 1,48E+01	(u) 1,50E+01
thermisch	1,93E+01	1,87E+01	1,88E+01	1,82E+01	2,16E+01	2,11E+01	1,79E+01	2,17E+01	1,86E+01	1,88E+01
Materialbedarf	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg
Anode ³⁾	4,50E-01	4,33E-01	4,35E-01	4,18E-01	5,15E-01	5,00E-01	4,10E-01	5,20E-01	4,30E-01	4,35E-01
Em. in Luft	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg
CO ₂	(b) 1,55E+00	(b) 1,49E+00	(b) 1,50E+00	(b) 1,44E+00	(b) 1,79E+00	(b) 1,74E+00	(b) 1,41E+00	(b) 1,81E+00	(b) 1,48E+00	(b) 1,50E+00

Gewichtung ⁵⁾	1,09E+05	6,46E+04	7,64E+04	9,20E+04	1,00E+05	1,30E+05	1,62E+05	8,50E+05	2,62E+05	6,00E+04
	Pawlek									
Energieträger	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg
Strom Al-Ind. ¹⁾	(u) 4,66E+01	(u) 5,76E+01	(u) 5,22E+01	(u) 5,26E+01	(u) 5,33E+01	(u) 5,08E+01	(u) 5,44E+01	(u) 5,94E+01	(u) 6,05E+01	(u) 5,72E+01
Petrolkoks ²⁾ (p)	(u) 1,55E+01	(u) 1,78E+01	(u) 1,38E+01	(u) 1,78E+01	(u) 1,42E+01	(u) 1,41E+01	(u) 1,45E+01	(u) 1,88E+01	(u) 1,97E+01	(u) 2,04E+01
thermisch	1,93E+01	2,16E+01	1,76E+01	2,16E+01	1,80E+01	1,79E+01	1,83E+01	2,26E+01	2,35E+01	2,42E+01
Materialbedarf	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg
Anode ³⁾	4,50E-01	5,15E-01	4,00E-01	5,15E-01	4,12E-01	4,10E-01	4,20E-01	5,44E-01	5,70E-01	5,90E-01
Em. in Luft	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg
CO ₂	(b) 1,55E+00	(b) 1,79E+00	(b) 1,37E+00	(b) 1,79E+00	(b) 1,41E+00	(b) 1,41E+00	(b) 1,44E+00	(b) 1,90E+00	(b) 1,99E+00	(b) 2,07E+00

Tabelle C.66: Prozeßspezifische Daten für den Einzelprozeß Schmelzflußelektrolyse (Teil 3). Die Angaben beziehen sich auf 1 kg Primäraluminium.

Gewichtung ⁵⁾	7,50E+05	6,00E+04	9,00E+04	1,80E+05	1,30E+05	2,50E+05	2,00E+04	1,00E+05	1,09E+05	3,60E+04
Pawlek										
Energieträger	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg
Strom Al-Ind. ¹⁾	(u) 5,67E+01	(u) 5,94E+01	(u) 5,67E+01	(u) 6,19E+01	(u) 5,65E+01	(u) 6,37E+01	(u) 6,59E+01	(u) 5,62E+01	(u) 4,86E+01	(u) 5,11E+01
Petrolkoks ²⁾ (p)	(u) 1,94E+01	(u) 1,92E+01	(u) 1,92E+01	(u) 2,03E+01	(u) 2,03E+01	(u) 2,28E+01	(u) 1,47E+01	(u) 1,80E+01	(u) 2,00E+01	(u) 2,19E+01
thermisch	2,32E+01	2,30E+01	2,30E+01	2,41E+01	2,41E+01	2,66E+01	1,85E+01	2,18E+01	2,38E+01	2,57E+01
Materialbedarf	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg
Anode ³⁾	5,63E-01	5,56E-01	5,56E-01	5,88E-01	5,88E-01	6,61E-01	4,25E-01	(n) 5,22E-01	5,80E-01	(n) 6,35E-01
Em. in Luft	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg
CO2	(b) 1,97E+00	(b) 1,94E+00	(b) 1,94E+00	(b) 2,06E+00	(b) 2,06E+00	(b) 2,33E+00	(b) 1,46E+00	(n) 1,82E+00	(b) 2,03E+00	(n) 2,23E+00
Gewichtung ⁵⁾	3,90E+04	7,90E+04	2,00E+05	7,40E+04	2,60E+04	5,00E+04	3,43E+05	1,77E+05	1,20E+05	1,32E+05
Pawlek										
Energieträger	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg
Strom Al-Ind. ¹⁾	(u) 4,75E+01	(u) 5,65E+01	(u) 5,00E+01	(u) 5,87E+01	(u) 4,76E+01	(u) 5,22E+01	(u) 6,37E+01	(u) 5,31E+01	(u) 6,05E+01	(u) 5,27E+01
Petrolkoks ²⁾ (p)	(u) 1,80E+01	(u) 1,57E+01	(u) 1,45E+01	(u) 1,73E+01	(u) 1,46E+01	(u) 1,83E+01	(u) 1,38E+01	(u) 1,83E+01	(u) 1,62E+01	(u) 1,79E+01
thermisch	2,18E+01	1,95E+01	1,83E+01	2,11E+01	1,84E+01	2,21E+01	1,76E+01	2,21E+01	2,00E+01	2,17E+01
Materialbedarf	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg
Anode ³⁾	5,22E-01	4,55E-01	4,20E-01	5,00E-01	4,22E-01	5,30E-01	4,00E-01	5,30E-01	4,70E-01	(n) 5,20E-01
Em. in Luft	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg
CO2	(b) 1,82E+00	(b) 1,57E+00	(b) 1,44E+00	(b) 1,74E+00	(b) 1,45E+00	(b) 1,85E+00	(b) 1,37E+00	(b) 1,85E+00	(b) 1,63E+00	(n) 1,81E+00
Gewichtung ⁵⁾	1,10E+04	3,80E+04	6,50E+04	5,00E+04	1,05E+05	1,80E+05	2,60E+05	1,28E+05	3,80E+05	2,69E+05
Pawlek										
Energieträger	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg
Strom Al-Ind. ¹⁾	(u) 5,83E+01	(u) 4,82E+01	(u) 5,54E+01	(u) 5,54E+01	(u) 5,08E+01	(u) 6,01E+01	(u) 4,97E+01	(u) 5,65E+01	(u) 4,75E+01	(u) 5,49E+01
Petrolkoks ²⁾ (p)	(u) 1,45E+01	(u) 1,41E+01	-	-	-	-	-	-	-	-
thermisch	1,83E+01	1,79E+01	-	-	-	-	-	-	-	-
Materialbedarf	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg
Anode ³⁾	4,20E-01	4,10E-01	-	-	-	-	-	-	-	-
Em. in Luft	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg
CO2	(b) 1,44E+00	(b) 1,41E+00	-	-	-	-	-	-	-	-
Gewichtung ⁵⁾	1,84E+05	2,70E+05	8,00E+04	3,25E+04	1,75E+04	2,80E+04	1,00E+05	3,60E+05	2,15E+05	1,60E+05
Pawlek										
Energieträger	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg
Strom Al-Ind. ¹⁾	(u) 5,26E+01	(u) 5,00E+01	(u) 5,29E+01	(u) 5,71E+01	(u) 5,34E+01	(u) 5,40E+01	(u) 5,47E+01	(u) 4,73E+01	(u) 4,86E+01	(u) 5,67E+01
Gewichtung ⁵⁾	2,40E+05	7,50E+04	4,00E+04	1,25E+05	2,20E+05	1,74E+05	2,80E+05	2,10E+05	1,45E+05	2,50E+05
Pawlek										
Energieträger	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg
Strom Al-Ind. ¹⁾	(u) 4,79E+01	(u) 5,35E+01	(u) 4,79E+01	(u) 5,43E+01	(u) 5,44E+01	(u) 5,04E+01	(u) 4,75E+01	(u) 5,47E+01	(u) 5,36E+01	(u) 5,72E+01
Gewichtung ⁵⁾	1,21E+05	9,10E+04	3,10E+05	1,20E+05	2,25E+05	2,35E+05	2,50E+04	1,90E+05	8,20E+04	7,50E+04
Pawlek										
Energieträger	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg
Strom Al-Ind. ¹⁾	(u) 6,30E+01	(u) 6,48E+01	(u) 5,58E+01	(u) 4,90E+01	(u) 5,47E+01	(u) 4,86E+01	(u) 5,29E+01	(u) 5,27E+01	(u) 5,19E+01	(u) 5,18E+01
Gewichtung ⁵⁾	1,75E+05	2,00E+04	7,30E+04	2,50E+04	2,70E+04	2,18E+05	2,25E+05	1,20E+04	1,80E+04	6,00E+04
Pawlek										
Energieträger	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg
Strom Al-Ind. ¹⁾	(u) 5,21E+01	(u) 6,10E+01	(u) 6,48E+01	(u) 5,58E+01	(u) 6,70E+01	(u) 4,72E+01	(u) 5,22E+01	(u) 6,12E+01	(u) 5,40E+01	(u) 5,94E+01

Tabelle C.67: Massenbilanz für den Einzelprozeß Schmelzflußelektrolyse.

Eingang [kg]	<x>	m
Energieträger	1,63E-01	5,78E-02
Luft ¹⁾	(b) 2,15E+00	(b) 7,66E-01
Material	3,82E+00	6,55E-02
Σ	6,14E+00	7,71E-01
Ausgang [kg]	<x>	m
Produkt	1,00E+00	0,00E+00
Abgas ¹⁾	(b) 2,32E+00	(b) 8,24E-01
Em. in Luft ²⁾	(b) 2,78E+00	(b) 6,22E-02
Σ	6,10E+00	8,27E-01

¹⁾ stöchiometrisch aus Verbrennung von Energieträgern
²⁾ Oxidationsabgabe der Anoden

Tabelle C.68: Prozeßspezifische Daten für den Einzelprozeß Aluminiumfluoridherstellung. Die Angaben beziehen sich auf 1 kg Aluminiumfluorid.

	<x>	m	s	n	Habersatter	Rohn	Schaefer	Berechnung
Energieträger	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg		MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg
Strom UCPTE	6,30E-01	6,30E-01	8,91E-01	2	1,26E+00	-	(a) 0,00E+00	-
Steinkohle	6,49E+00	3,25E+00	3,25E+00	1	6,49E+00	-	-	-
Öl S	4,37E+00	2,19E+00	2,19E+00	1	4,37E+00	-	-	-
thermisch	3,25E+01	2,17E+01	3,06E+01	2	1,09E+01	-	5,42E+01	-
Materialbedarf	kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg
AlF ₃	-1,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1	-	-	-	-
Bauxit	1,53E+00	7,64E-01	7,64E-01	1	1,53E+00	-	-	-
Brannkalk	2,78E-02	1,39E-02	1,39E-02	1	2,78E-02	-	-	-
H ₂ SiF ₆	8,08E-01	4,04E-01	4,04E-01	1	-	8,08E-01	-	-
NaOH	1,33E-01	6,67E-02	6,67E-02	1	1,33E-01	-	-	-
Wasser	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1	0,00E+00	-	-	-
Kieselsäure ¹⁾	-5,39E-01	2,69E-01	2,69E-01	1	-	(b) -5,39E-01	-	-
Em. in Luft	kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg
C ₂ F ₆	-	-	-	0	-	-	-	-
CF ₄	-	-	-	0	-	-	-	-
CH ₄	-	-	-	0	-	-	-	-
CO	-	-	-	0	-	-	-	-
CO ₂	-	-	-	0	-	-	-	-
HCl	-	-	-	0	-	-	-	-
HF	2,00E-04	1,00E-04	1,00E-04	1	2,00E-04	-	-	-
N ₂ O	-	-	-	0	-	-	-	-
NH ₃	-	-	-	0	-	-	-	-
NM VOC	-	-	-	0	-	-	-	-
NO _x	-	-	-	0	-	-	-	-
SO ₂	4,00E-05	2,00E-05	2,00E-05	1	4,00E-05	-	-	-
Staub	1,00E-02	5,00E-03	5,00E-03	1	1,00E-02	-	-	-
Abwasser ²⁾	kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg
	1,33E-01	6,67E-02	6,67E-02	1	-	-	-	(b) 1,33E-01
Abfall	kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg
Rotschlamm ³⁾	3,10E-03	1,55E-03	1,55E-03	1	3,10E-03	-	-	-
	7,64E-01	3,82E-01	3,82E-01	1	-	-	-	(b) 7,64E-01

¹⁾ Monokieselsäure, stöchiometrisch berechnet ²⁾ Schätzung ³⁾ ca. 50% des Bauxits wird als Rotschlamm freigesetzt

Tabelle C.69: Massenbilanz für den Einzelprozeß Aluminiumfluoridherstellung.

Eingang [kg]	<x>	m
Energieträger	3,29E-01	1,23E-01
Luft ¹⁾	(b) 3,15E+00	(b) 1,12E+00
Material	2,50E+00	8,67E-01
Σ	5,97E+00	1,42E+00
Ausgang [kg]	<x>	m
Produkt	1,00E+00	0,00E+00
Abgas ¹⁾	(b) 3,42E+00	(b) 1,22E+00
Em. in Luft	1,02E-02	5,00E-03
Material	5,39E-01	2,69E-01
Abwasser	1,33E-01	6,67E-02
Abraum	7,67E-01	3,82E-01
Asche	1,88E-02	9,41E-03
Σ	5,89E+00	1,31E+00

¹⁾ stöchiometrisch aus Energieträgerbedarf

Tabelle C.70: Prozeßspezifische Daten für den Einzelprozeß Anodenherstellung. Die Angaben beziehen sich auf 1 kg Anoden für die Schmelzflußelektrolyse.

	<x>	m	s	n	Habersatter	Wagner	Rohn	Schaefer	SRU 250	Gemis 2.1
Energieträger	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg		MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg
Strom UCPTE	8,81E-01	2,01E-01	2,84E-01	2	1,08E+00	-	-	(u) 6,80E-01	-	-
Steinkohle ¹⁾ (p)	3,48E+00	1,74E+00	1,74E+00	1	3,48E+00	-	-	-	-	-
Erdgas ¹⁾	6,46E+00	2,14E+00	3,03E+00	2	4,31E+00	-	-	-	-	(u) 8,60E+00
thermisch	8,43E+00	6,84E-01	1,19E+00	3	9,52E+00	-	-	7,17E+00	-	8,60E+00
Materialbedarf	kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg
Anode	-1,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1	-	-	-	-	-	-
Anodenreste	2,04E-01	4,28E-02	7,41E-02	3	2,22E-01	-	-	1,22E-01	2,67E-01	-
Pech	2,29E-01	3,73E-02	7,46E-02	4	2,09E-01	2,27E-01	-	3,30E-01	1,51E-01	-
Petrolkoks	7,70E-01	4,32E-02	8,65E-02	4	8,74E-01	7,73E-01	-	7,70E-01	6,63E-01	-
Wasser	6,11E-02	3,05E-02	3,05E-02	1	6,11E-02	-	-	-	-	-
Em. in Luft	kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg
C2F6	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-
CF4	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-
CH4	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-
CO	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-
CO2	7,61E-01	3,80E-01	3,80E-01	1	-	-	-	-	7,61E-01	-
HCl	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-
HF	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-
N2O	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-
NH3	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-
NMVOC	1,39E-05	6,94E-06	6,94E-06	1	-	-	-	-	1,39E-05	-
NOx	5,65E-04	2,83E-04	2,83E-04	1	-	-	-	-	5,65E-04	-
SO2	5,79E-04	3,38E-04	4,78E-04	2	9,16E-04	-	-	-	2,41E-04	-
Staub	3,39E-04	1,70E-04	1,70E-04	1	-	-	-	-	3,39E-04	-

¹⁾ inklusive Energieaufwand zur Herstellung von Petrolkoks und Steinkohlenteerpech

Tabelle C.71: Massenbilanz für den Einzelprozeß Anodenherstellung für die Schmelzflußelektrolyse.

Eingang [kg]	<x>	m
Energieträger	2,79E-01	7,98E-02
Luft ¹⁾	(b) 1,03E+00	(b) 3,41E-01
Luft ²⁾	(b) 2,21E+00	(b) 1,11E+00
Material	1,26E+00	7,76E-02
Σ	4,79E+00	1,16E+00
Ausgang [kg]	<x>	m
Produkt	1,00E+00	0,00E+00
Abgas ¹⁾	(b) 1,18E+00	(b) 3,92E-01
Abgas ²⁾	(b) 2,51E+00	(b) 1,26E+00
	4,69E+00	1,31E+00

¹⁾ stöchiometrisch aus Energieträgerbedarf

²⁾ stöchiom. aus prozeßbed. CO₂-Emissionen

Tabelle C.72: Prozeßspezifische Daten für den Einzelprozeß Walzbarrenherstellung. Die Angaben beziehen sich auf 1 kg Walzbarren.

	<x>	m	s	n	Habersatter	Schaefer		Wagner	Rohn	
Energieträger	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg		MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg
Strom UCPTB	2,43E-01	1,60E-02	3,91E-02	6	2,98E-01	2,14E-01	2,65E-01	1,87E-01	2,39E-01	2,53E-01
Erdgas	2,40E+00	5,22E-01	1,28E+00	6	1,17E+00	(b) 1,00E+00	(b) 1,61E+00	3,55E+00	(b) 3,87E+00	(b) 3,19E+00
thermisch	2,40E+00	5,22E-01	1,28E+00	6	1,17E+00	1,00E+00	1,61E+00	3,55E+00	3,87E+00	3,19E+00
Materialbedarf	kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg
Alu. primär	6,24E-01	6,68E-02	1,49E-01	5	7,39E-01	7,07E-01	5,61E-01	-	3,89E-01	7,23E-01
Al. Walzbarren	-1,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1	-	-	-	-	-	-
Schrott	1,35E-01	7,39E-02	1,65E-01	5	0,00E+00	1,63E-01	1,10E-01	-	4,02E-01	0,00E+00
Schrott Umlauf	2,71E-01	3,68E-02	8,23E-02	5	2,61E-01	1,50E-01	3,56E-01	-	2,51E-01	3,39E-01
Abbrand	-3,01E-02	1,05E-02	2,34E-02	5	0,00E+00	-1,96E-02	-2,71E-02	-	-4,16E-02	-6,23E-02
Em. in Luft	kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg
C2F6	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-
CF4	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-
CH4	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-
CO	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-
CO2	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-
HCl	5,00E-05	2,50E-05	2,50E-05	1	5,00E-05	-	-	-	-	-
HF	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-
N2O	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-
NH3	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-
NM VOC	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-
NOx	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-
SO2	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-
Staub	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-

Tabelle C.73: Kovarianzen der Energieträger bei der Walzbarrenherstellung.

s_{xy}/n	Strom UCPTE	Erdgas
Strom UCPTE	0,00E+00	-3,58E-03
Erdgas	-3,58E-03	0,00E+00

Tabelle C.74: Massenbilanz für den Einzelprozeß Walzbarrenherstellung.

Eingang [kg]	<x>	m
Energieträger	5,95E-02	1,30E-02
Luft ¹⁾	(b) 3,81E-01	(b) 8,30E-02
Material	1,06E+00	1,07E-01
Σ	1,50E+00	1,36E-01
Ausgang [kg]	<x>	m
Produkt	1,00E+00	0,00E+00
Abgas ¹⁾	(b) 4,39E-01	(b) 9,56E-02
Em. in Luft	5,00E-05	2,50E-05
Σ	1,44E+00	9,56E-02
¹⁾ stöchiometrisch aus Energieträgerbedarf		

Tabelle C.75: Prozeßspezifische Daten für den Einzelprozeß Homogenisieren. Die Angaben beziehen sich auf 1 kg homogenisierte Walzbarren.

	<x>	m	s	n	Schaefer	Wagner
Energieträger	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg		MJ/kg	MJ/kg
Strom UCPT	1,85E-01	5,00E-03	7,07E-03	2	1,80E-01	1,90E-01
Erdgas	1,69E+00	8,45E-01	8,45E-01	1	-	1,69E+00
thermisch	1,69E+00	5,00E-03	7,07E-03	2	1,68E+00	1,69E+00
Materialbedarf	kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg
Al. Walzbarren	1,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2	1,00E+00	1,00E+00
Walzb. hom. ¹⁾	-1,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1	-	-
Schrott Umlauf	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2	0,00E+00	0,00E+00
Em. in Luft	kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg
C2F6	-	-	-	0	-	-
CF4	-	-	-	0	-	-
CH4	-	-	-	0	-	-
CO	-	-	-	0	-	-
CO2	-	-	-	0	-	-
HCl	-	-	-	0	-	-
HF	-	-	-	0	-	-
N2O	-	-	-	0	-	-
NH3	-	-	-	0	-	-
NMVOC	-	-	-	0	-	-
NOx	-	-	-	0	-	-
SO2	-	-	-	0	-	-
Staub	-	-	-	0	-	-

¹⁾ Aluminiumwalzbarren homogenisiert

Tabelle C.76: Massenbilanz für den Einzelprozeß Homogenisieren.

Eingang [kg]	<x>	m
Energieträger	4,19E-02	2,10E-02
Luft ¹⁾	(b) 2,69E-01	(b) 1,34E-01
Material	1,00E+00	0,00E+00
Σ	1,31E+00	1,36E-01
Ausgang [kg]	<x>	m
Produkt	1,00E+00	0,00E+00
Abgas ¹⁾	(b) 3,09E-01	(b) 1,55E-01
Σ	1,31E+00	1,55E-01

¹⁾ stöchiometrisch aus Energieträgerbedarf

Tabelle C.77: Prozeßspezifische Daten für den Einzelprozeß Warmwalzen. Die Angaben beziehen sich auf 1 kg Warmband.

	<x>	m	s	n	Habersatter	Wagner	Schaefer
Energieträger	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg		MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg
Strom UCPTe	5,55E-01	7,50E-02	1,06E-01	2	-	4,80E-01	6,30E-01
thermisch	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1	-	0,00E+00	-
Materialbedarf	kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg
Walzb. hom. ¹⁾	1,13E+00	9,53E-03	1,35E-02	2	1,14E+00	-	1,12E+00
Schrott	-1,27E-01	9,53E-03	1,35E-02	2	-1,36E-01	-	-1,17E-01
Walzöl	1,78E-03	1,74E-04	2,46E-04	2	-	1,95E-03	1,60E-03
Warmband Al.	-1,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1	-	-	-
Em. in Luft	kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg
C2F6	-	-	-	0	-	-	-
CF4	-	-	-	0	-	-	-
CH4	-	-	-	0	-	-	-
CO	-	-	-	0	-	-	-
CO2	-	-	-	0	-	-	-
HCl	-	-	-	0	-	-	-
HF	-	-	-	0	-	-	-
N2O	-	-	-	0	-	-	-
NH3	-	-	-	0	-	-	-
NMVOC	-	-	-	0	-	-	-
NOx	-	-	-	0	-	-	-
SO2	-	-	-	0	-	-	-
Staub	-	-	-	0	-	-	-

¹⁾ Aluminiumwalzbarren homogenisiert

Tabelle C.78: Massenbilanz für den Einzelprozeß Warmwalzen.

Eingang [kg]	<x>	m
Material	1,13E+00	9,53E-03
Σ	1,13E+00	9,53E-03
Ausgang [kg]	<x>	m
Produkt	1,00E+00	0,00E+00
Schrott	1,27E-01	-9,53E-03
Σ	1,13E+00	9,53E-03

Tabelle C.79: Prozeßspezifische Daten für den Einzelprozeß Kaltwalzen.
Die Angaben beziehen sich auf 1 kg Kaltband.

	<x>	m	s	n	Schaefer		Wagner
Energieträger	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg		MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg
Strom UCPTB	7,86E-01	1,87E-01	3,24E-01	3	5,76E-01	1,16E+00	6,24E-01
Erdgas	4,22E-01	2,11E-01	2,11E-01	1	-	-	4,22E-01
thermisch	4,36E-01	1,40E-02	1,98E-02	2	-	4,50E-01	4,22E-01
Materialbedarf	kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg
Kaltband Al.	-1,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1	-	-	-
Schrott	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2	0,00E+00	0,00E+00	-
Walzöl	2,19E-03	1,22E-04	2,11E-04	3	2,32E-03	2,32E-03	1,95E-03
Warmband Al.	1,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2	1,00E+00	1,00E+00	-
Em. in Luft	kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg
C2F6	-	-	-	0	-	-	-
CF4	-	-	-	0	-	-	-
CH4	-	-	-	0	-	-	-
CO	-	-	-	0	-	-	-
CO2	-	-	-	0	-	-	-
HCl	-	-	-	0	-	-	-
HF	-	-	-	0	-	-	-
N2O	-	-	-	0	-	-	-
NH3	-	-	-	0	-	-	-
NMVOC	-	-	-	0	-	-	-
NOx	-	-	-	0	-	-	-
SO2	-	-	-	0	-	-	-
Staub	-	-	-	0	-	-	-

Tabelle C.80: Massenbilanz für den Einzelprozeß Kaltwalzen.

Eingang [kg]	<x>	m
Energieträger	1,05E-02	5,23E-03
Luft ¹⁾	(b) 6,71E-02	(b) 3,35E-02
Material	1,00E+00	1,22E-04
Σ	1,08E+00	3,39E-02
Ausgang [kg]	<x>	m
Produkt	1,00E+00	0,00E+00
Abgas ¹⁾	(b) 7,72E-02	(b) 3,86E-02
Σ	1,08E+00	3,86E-02

¹⁾ stöchiometrisch aus Energieträgerbedarf

Tabelle C.81: Prozeßspezifische Daten für den Einzelprozeß Besäumen.
Die Angaben beziehen sich auf 1 kg Aluminiumblech.

	<x>	m	s	n	Habersatter	Schaefer		Wagner
Energieträger	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg		MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg
Strom UCPTE	1,92E-01	1,28E-01	2,21E-01	3	-	5,04E-02	4,46E-01	(u) 7,80E-02
Erdgas	1,90E-01	1,90E-01	2,69E-01	2	-	(b) 0,00E+00	(b) 3,80E-01	-
thermisch	1,90E-01	1,90E-01	2,69E-01	2	-	0,00E+00	3,80E-01	-
Materialbedarf	kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg
Alu-Blech	-1,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1	-	-	-	-
Kaltband Al.	1,21E+00	9,75E-02	1,69E-01	3	1,19E+00	1,05E+00	1,39E+00	-
Schrott	-2,11E-01	9,75E-02	1,69E-01	3	-1,91E-01	-5,30E-02	-3,89E-01	-
Bm. in Luft	kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg
C2F6	-	-	-	0	-	-	-	-
CF4	-	-	-	0	-	-	-	-
CH4	-	-	-	0	-	-	-	-
CO	-	-	-	0	-	-	-	-
CO2	-	-	-	0	-	-	-	-
HCl	-	-	-	0	-	-	-	-
HF	-	-	-	0	-	-	-	-
N2O	-	-	-	0	-	-	-	-
NH3	-	-	-	0	-	-	-	-
NMVOC	-	-	-	0	-	-	-	-
NOx	-	-	-	0	-	-	-	-
SO2	-	-	-	0	-	-	-	-
Staub	-	-	-	0	-	-	-	-

Tabelle C.82: Kovarianzen der Energieträger beim Besäumen.

s_{xy}/n	Strom UCPTE	Erdgas
Strom UCPTE	0,00E+00	3,76E-02
Erdgas	3,76E-02	0,00E+00

Tabelle C.83: Massenbilanz für den Einzelprozeß Besäumen.

Eingang [kg]	<x>	m
Energieträger	4,71E-03	4,71E-03
Luft ¹⁾	(b) 3,02E-02	(b) 3,02E-02
Material	1,21E+00	9,75E-02
Σ	1,25E+00	1,02E-01
Ausgang [kg]	<x>	m
Produkt	1,00E+00	0,00E+00
Abgas ¹⁾	(b) 3,48E-02	(b) 3,48E-02
Schrott	2,11E-01	9,75E-02
Σ	1,25E+00	9,75E-02
¹⁾ stöchiometrisch aus Energieträgerbedarf		

Tabelle C.84: Prozeßspezifische Daten für den Einzelprozeß Stanzen und Pressen. Die Angaben beziehen sich auf 1 kg gepreßtes Aluminiumblech.

	<x>	m	s	n	nach IISI	nach IFE/FFE	Franze		Harum	Philipp 96	Behr	
Energieträger	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg		MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg
Strom UCPIE ¹⁾	1,61E+00	6,50E-01	1,13E+00	3	(b) 2,42E+00	(b) 2,08E+00	-	-	-	3,24E-01	-	-
Materialbedarf	kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg
Alu-Blech	1,44E+00	1,73E-02	3,19E-02	6	1,45E+00	1,42E+00	[1,35E+00;	1,55E+00]	(n) 1,82E+00	-	[1,35E+00;	1,50E+00]
Blech gepreßt	-1,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1	-	-	-	-	-	-	-	-
Schrott	-4,36E-01	1,73E-02	3,19E-02	6	-4,50E-01	-4,18E-01	[-3,50E-01;	-5,50E-01]	-(n) 8,18E-01	-	[-3,50E-01;	-5,00E-01]
Em. in Luft	kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg
C2F6	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-
CP4	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-
CH4	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-
CO	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-
CO2	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-
HCl	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-
HF	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-
N2O	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-
NH3	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-
NMVOc	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-
NOx	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-
SO2	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-
Staub	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-

¹⁾ Berechnung aus Primärenergieangaben mit Bereitstellungsnutzungsgrad $\eta = 0,33$

Tabelle C.85: Massenbilanz für den Einzelprozeß Pressen von Aluminiumblech.

Eingang [kg]	<x>	m
Material	1,44E+00	1,73E-02
Σ	1,44E+00	1,73E-02
Ausgang [kg]	<x>	m
Produkt	1,00E+00	0,00E+00
Schrott	4,36E-01	1,73E-02
Σ	1,44E+00	1,73E-02

Tabelle C.86: Prozeßspezifische Daten für den Einzelprozeß Fügen einer Aluminiumrohkarosserie. Die Angaben beziehen sich auf 1 kg gefügte Karosserie.

Energieträger	<x>	m	s	n	HSI		IFE/FFE		Schweimer	
	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg		MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg
Strom UCPT ¹⁾	4,97E+00	1,36E+00	3,33E+00	6	(b) 5,77E+00	(b) 1,92E+00	(b) 1,94E+00	(b) 5,81E+00	(b) 3,59E+00	(b) 1,08E+01
	kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg
Blech gepreßt	1,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1	-	-	-	-	-	-
Kar. ungeh. ²⁾	-1,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1	-	-	-	-	-	-
	kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg
C2F6	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-
CF4	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-
CH4	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-
CO	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-
CO2	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-
HCl	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-
HF	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-
N2O	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-
NH3	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-
NMVOC	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-
NOx	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-
SO2	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-
Staub	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-

¹⁾Berechnung aus Primärenergie mit Bereitstellungsnutzungsgrad $\eta = 0,33$; Abschätzung nach unten durch Wert wie Stahlkarosserie, nach oben durch dreifachen Wert nach HSI.

²⁾ Aluminiumrohkarosserie nicht ausgehärtet.

Tabelle C.87: Massenbilanz für den Einzelprozeß Fügen einer Aluminiumrohkarosserie.

Eingang [kg]	<x>	m
Material	1,00E+00	0,00E+00
Σ	1,00E+00	0,00E+00
Ausgang [kg]	<x>	m
Produkt	1,00E+00	0,00E+00
Σ	1,00E+00	0,00E+00

Tabelle C.88: Prozeßspezifische Daten für den Einzelprozeß Aushärten einer Aluminiumrohkarosserie. Die Angaben beziehen sich auf 1 kg gehärtete Karosserie.

	<x>	m	s	n	HSI
Energieträger	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg		MJ/kg
Erdgas ¹⁾	4,18E+00	2,09E+00	2,09E+00	1	(b) 4,18E+00
thermisch	4,18E+00	2,09E+00	2,09E+00	1	(b) 4,18E+00
Materialbedarf	kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg
Kar. Alu. ²⁾	-1,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1	-
Kar. ungeh. ³⁾	1,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1	-
Em. in Luft	kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg
C2F6	-	-	-	0	-
CF4	-	-	-	0	-
CH4	-	-	-	0	-
CO	-	-	-	0	-
CO2	-	-	-	0	-
HCl	-	-	-	0	-
HF	-	-	-	0	-
N2O	-	-	-	0	-
NH3	-	-	-	0	-
NMVOC	-	-	-	0	-
NOx	-	-	-	0	-
SO2	-	-	-	0	-
Staub	-	-	-	0	-
¹⁾ Berechnung aus Primärenergieangaben mit Bereitstellungsnutzungsgrad $\eta = 0,9$. ²⁾ gehärtete Aluminiumrohkarosserie ³⁾ ungehärtete Aluminiumrohkarosserie					

Tabelle C.89: Massenbilanz für den Einzelprozeß Aushärten einer Aluminiumrohkarosserie.

Eingang [kg]	<x>	m
Energieträger	1,04E-01	5,18E-02
Luft ¹⁾	(b) 6,64E-01	(b) 3,32E-01
Material	1,00E+00	0,00E+00
Σ	1,77E+00	3,36E-01
Ausgang [kg]	<x>	m
Produkt	1,00E+00	0,00E+00
Abgas ¹⁾	(b) 7,64E-01	(b) 3,82E-01
Σ	1,76E+00	3,82E-01
¹⁾ stöchiometrisch aus Energieträgerbedarf		

Tabelle C.90: Prozeßspezifische Daten für den Einzelprozeß Neuschrottaufbereitung. Die Angaben beziehen sich auf 1 kg Neuschrotteinsatz.

Energieträger	Schaefer					
	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg		MJ/kg	MJ/kg
Strom UCPTE	1,07E+00	6,59E-01	9,32E-01	2	1,73E+00	4,10E-01
Erdgas	3,50E+00	1,41E+00	2,00E+00	2	2,08E+00	4,91E+00
thermisch	3,50E+00	1,41E+00	2,00E+00	2	(b) 2,08E+00	(b) 4,91E+00
Materialbedarf	kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg
Schrott	1,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1	1,04E+00	1,05E+00
Schrott Uml.	-9,55E-01	5,00E-03	7,07E-03	2	-9,60E-01	-9,50E-01
Em. in Luft	kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg
C2F6	-	-	-	0	-	-
CF4	-	-	-	0	-	-
CH4	-	-	-	0	-	-
CO	-	-	-	0	-	-
CO2	-	-	-	0	-	-
HCl	-	-	-	0	-	-
HF	-	-	-	0	-	-
N2O	-	-	-	0	-	-
NH3	-	-	-	0	-	-
NM VOC	-	-	-	0	-	-
NOx	-	-	-	0	-	-
SO2	-	-	-	0	-	-
Staub	-	-	-	0	-	-
	kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg	kg/kg
Abfall	4,50E-02	5,00E-03	7,07E-03	0	4,00E-02	5,00E-02

Tabelle C.91: Kovarianzen der Energieträger bei der Neuschrottaufbereitung.

s_{xy}/n	Strom UCPTE	Erdgas
Strom UCPTE	0,00E+00	-9,32E-01
Erdgas	-9,32E-01	0,00E+00

Tabelle C.92: Massenbilanz für den Einzelprozeß Neuschrottaufbereitung.

Eingang [kg]	$\langle x \rangle$	m
Energieträger	8,68E-02	3,51E-02
Luft ¹⁾	(b) 5,56E-01	(b) 2,25E-01
Material	1,00E+00	0,00E+00
Σ	1,64E+00	2,27E-01
Ausgang [kg]	$\langle x \rangle$	m
Produkt	9,55E-01	5,00E-03
Abgas ¹⁾	(b) 6,40E-01	(b) 2,59E-01
Abfall	4,50E-02	5,00E-03
	1,64E+00	2,59E-01
¹⁾ stöchiometrisch aus Energieträgerbedarf		

Tabelle C.93: Spezifische Daten für die Teilprozeßkette Tonerdeherstellung. Die Teilprozeßkette umfaßt die Einzelprozesse Bauxitabbau, Bayer-Prozeß, Natronlaugenherstellung, Kalksteinabbau und -Kalzination. Alle Angaben beziehen sich auf 1 kg Tonerde.

	<x>	m	s	n	SRU 250 ¹⁾
Materialbedarf	kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg
Bauxit	-	-	-	0	(n) 1,93E+00
Brannkalk	-	-	-	0	(n) 5,00E-02
NaOH	-	-	-	0	(n) 9,58E-02
Tonerde	-1,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1	-
Em. in Luft	kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg
C2F6	-	-	-	0	-
CF4	-	-	-	0	-
CH4	1,48E-03	7,40E-04	7,40E-04	1	1,48E-03
CO	2,43E-04	1,22E-04	1,22E-04	1	2,43E-04
CO2	1,16E+00	5,80E-01	5,80E-01	1	1,16E+00
HCl	2,84E-05	1,42E-05	1,42E-05	1	2,84E-05
HF	2,24E-06	1,12E-06	1,12E-06	1	2,24E-06
N2O	-	-	-	0	-
NH3	3,56E-07	1,78E-07	1,78E-07	1	3,56E-07
NMVOC	2,53E-03	1,27E-03	1,27E-03	1	2,53E-03
NOx	3,20E-03	1,60E-03	1,60E-03	1	3,20E-03
SO2	1,08E-02	5,40E-03	5,40E-03	1	1,08E-02
Staub	7,91E-03	3,96E-03	3,96E-03	1	7,91E-03
	kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg
Abfall	6,70E-02	3,35E-02	3,35E-02	1	6,70E-02
Rotschlamm	-	-	-	0	(b,n) 9,65E+00

¹⁾ Nicht berücksichtigte Werte ließen sich dem Einzelprozeß "Bayer-Prozeß" zuordnen und sind dort bereits erfaßt.

Tabelle C.94: Rudimentäre Massenbilanz für die Teilprozeßkette Tonerdeherstellung. (Siehe auch einleitende Bemerkungen zu diesem Kapitel.)

Eingang [kg]	<x>	m
Material	2,08E+00	1,04E+00
Σ	2,08E+00	1,04E+00
Ausgang [kg]	<x>	m
Produkt	1,00E+00	0,00E+00
Rotschlamm	9,65E-01	4,83E-01
Abfall	6,70E-02	3,35E-02
Σ	2,03E+00	4,84E-01

Tabelle C.95: Spezifische Daten für die Teilprozeßkette Primäraluminiumherstellung. Die Teilprozeßkette umfaßt die Einzelprozesse Schmelzflußelektrolyse, Aluminiumfluoridherstellung, Anodenherstellung und Walzbarrenherstellung. Alle Angaben beziehen sich auf 1 kg Primäraluminium.

	<x>	m	s	n	SRU 250
Energieträger	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg		MJ/kg
Strom Al-Ind. ¹⁾	5,51E+01	2,76E+01	2,76E+01	1	5,51E+01
Materialbedarf	kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg
Walzbarren	-1,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1	-
Tonerde	-	-	-	0	(a) 1,92E+00
Em. in Luft	kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg
C2F6	-	-	-	0	-
CF4	4,00E-04	2,00E-04	2,00E-04	1	4,00E-04
CH4	3,39E-03	1,69E-03	1,69E-03	1	3,39E-03
CO	6,04E-02	3,02E-02	3,02E-02	1	6,04E-02
CO2	2,36E+00	1,18E+00	1,18E+00	1	2,36E+00
HCl	1,05E-05	5,26E-06	5,26E-06	1	1,05E-05
HF	1,01E-06	5,04E-07	5,04E-07	1	1,01E-06
N2O	-	-	-	0	-
NH3	1,27E-07	6,37E-08	6,37E-08	1	1,27E-07
NMVOC	3,92E-03	1,96E-03	1,96E-03	1	3,92E-03
NOx	2,15E-03	1,07E-03	1,07E-03	1	2,15E-03
SO2	1,78E-02	8,91E-03	8,91E-03	1	1,78E-02
Staub	2,14E-03	1,07E-03	1,07E-03	1	2,14E-03

¹⁾ verknüpft mit Modell nach Abschnitt 4.2.5

Die Erstellung einer Massenbilanz ist aus den Daten in Tabelle C.95 nicht sinnvoll möglich. (Siehe auch einleitende Bemerkungen zu diesem Kapitel.)

Prozeßspezifische Daten zum Shreddern von Aluminiumkarosserien finden sich in Tabelle 4.15.

Tabelle C.96: Massenbilanz für den Einzelprozeß Shreddern einer Aluminiumrohkarosserie.

Eingang [kg]	<x>	m
Energieträger	2,66E-04	1,33E-04
Luft ¹⁾	(b) 3,45E-03	(b) 1,72E-03
Material	1,18E+00	5,88E-01
Σ	1,18E+00	5,88E-01
Ausgang [kg]	<x>	m
Produkt	1,00E+00	0,00E+00
Abgas ¹⁾	(b) 3,72E-03	(b) 1,86E-03
Abraum	1,76E-01	8,82E-02
	1,18E+00	8,83E-02

¹⁾ stöchiometrisch aus Energieträgerbedarf

Prozeßspezifische Daten zur Sekundäraluminiumherzeugung finden sich in Tabelle 4.17.

Tabelle C.97: Massenbilanz für den Einzelprozeß Sekundäraluminiumherzeugung.

Eingang [kg]	<x>	m ¹⁾
Energieträger	2,08E-01	7,92E-02
Luft ¹⁾	(b) 2,29E+00	(b) 9,62E-01
Material	1,31E+00	4,96E-01
Σ	3,80E+00	1,09E+00
Ausgang [kg]	<x>	m ¹⁾
Produkt	1,00E+00	0,00E+00
Abgas ¹⁾	(b) 2,50E+00	(b) 1,04E+00
Material	(b) 3,20E-02	(b) 1,50E-02
TER ²⁾	2,53E-01	1,27E-01
Σ	3,78E+00	1,05E+00

¹⁾ stöchiometrisch aus Energieträgerbedarf

²⁾ Tonerderückstand

³⁾ Geschätzt, da n=1.

Anhang D

Energiebereitstellung

D.1 Feuerungen

Das Verhältnis zwischen Rohkohlebedarf und verwendbarer Kohle wird nach [33] wesentlich durch die Kohleaufbereitung bestimmt. Es werden Aufbereitungsverluste zwischen 0% (keine Aufbereitung) und 58% genannt. Differenziert man nach Untertage- und Tagebauförderung, so lassen sich folgende Bereichsangaben für den Rohkohleinsatz pro aufbereiteter Steinkohle ableiten:

Tagebau	[kg/kg]:	$< 1,43 >$	$[0;1,61]$
Untertagebau	[kg/kg]:	$< 1,67 >$	$[0;2,38]$

Da die Kohleaufbereitung den Regelfall darstellt, findet die untere Bereichsgrenze keine Berücksichtigung, es ergibt sich

Tagebau:	$(1,43 \pm 0,09) \text{ kg/kg}$
Untertagebau:	$(1,67 \pm 0,36) \text{ kg/kg}$

Gewichtet mit einem Anteil von 27% Tagebau und 73% Untertageförderung [33], findet man als Mittelwert mit inneren Standardabweichungen¹ $m_i = s_i$:

$$(1,60 \pm 0,26) \text{ kg/kg}.$$

Der Wert stimmt innerhalb des Fehlers gut mit dem nach Angaben in [33] berechneten von 1,55 kg/kg überein, die Standardabweichung wird daher übertragen.

Im Falle des Erdgases wird das Verhältnis zwischen Rohförderung und verwendeter Gasmenge maßgeblich durch die Verluste bei Förderung, Transport und Aufbereitung bestimmt. Die daraus resultierenden Streuungen werden in Tabelle D.2 bestimmt und die relativen Standardabweichungen für Tabelle D.1 übernommen.

Für schweres und extra leichtes Heizöl liegen entsprechende Daten nicht vor, der energetische Bereitstellungsaufwand wird mit dem Schätzfehler versehen.

¹Die äußere Standardabweichung ist mit $s_a = 0,11 \text{ kg/kg}$ kleiner als das innere Streumaß.

Tabelle D.1: Spezifische Prozeßdaten der Industriefeuerung „Erdgas“. Alle Angaben beziehen sich auf 1 MJ verbrannten Energieträger.

	<x>	m	s	n	Frisknecht
Energieträger	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg		MJ/kg
Steinkohle	-	-	-	0	-
Erdgas ¹⁾	1,07E+00	3,62E-02	8,10E-02	6	1,07E+00
Öl	-	-	-	0	-
Em. in Luft ²⁾	kg/kg	kg/kg	kg/kg		kg/kg
C2F6	-	-	-	0	-
CF4	-	-	-	0	-
CH4	1,82E-04	4,52E-05	9,84E-05	7	1,82E-04
CO	2,73E-05	1,37E-05	1,37E-05	1	2,73E-05
CO2	6,44E-02	4,92E-04	1,10E-03	4	6,44E-02
HCl	4,30E-07	2,15E-07	2,15E-07	1	4,30E-07
HF	4,52E-08	2,26E-08	2,26E-08	1	4,52E-08
N2O	6,89E-07	3,44E-07	3,44E-07	1	6,89E-07
NH3	9,75E-09	4,88E-09	4,88E-09	1	9,75E-09
NM VOC	9,52E-06	4,52E-05	9,84E-05	1	9,52E-06
NOx	5,74E-05	1,91E-05	1,91E-05	2	5,74E-05
SO2	3,98E-05	1,35E-05	1,35E-05	6	3,98E-05
Staub	1,79E-05	8,97E-06	8,97E-06	1	1,79E-05

¹⁾ Die Bestimmung der Standardabweichungen wird im Text erläutert.
²⁾ Erläuterungen finden sich in Abschnitt 4.2.5.

Tabelle D.2: Verluste an Erdgas bei Förderung, Aufbereitung und Transport. Alle Angaben sind nach [33] in [m³/m³].

Land	<x>	m	s	n	NL	N	D	GUS	Algerien	
Förderung					1,014	1,020	1,013	1,018	1,027	1,027
Aufbereitung					1,002	1,003	1,002	1,003	1,002 ¹⁾	1,002 ¹⁾
Ferntransport					1,020	1,030	1,020	1,200	1,002 ¹⁾	1,200
total	1,10E+00	3,72E-02	8,32E-02	6	1,036	1,054	1,035	1,225	1,027	1,232
UCPTE					0,090	0,320	0,210	0,230	0,024	0,036

¹⁾ Schätzung

Tabelle D.3: Spezifische Prozeßdaten der Industriefeuerung „Heizöl-schwer“. Alle Angaben beziehen sich auf 1 MJ verbrannten Energieträger.

	<x>	m	s	n	Frisknecht
Energieträger	MJ/MJ	MJ/MJ	MJ/MJ		MJ/MJ
Steinkohle	-	-	-	0	-
Erdgas	-	-	-	0	-
Öl ¹⁾	1,21E+00	1,05E-01	1,05E-01	1	1,21E+00
Em. in Luft ²⁾	kg/MJ	kg/MJ	kg/MJ		kg/MJ
C2F6	-	-	-	0	-
CF4	-	-	-	0	-
CH4	1,22E-04	2,75E-05	2,75E-05	3	1,22E-04
CO	3,40E-05	1,70E-05	1,70E-05	1	3,40E-05
CO2	9,56E-02	5,51E-04	1,46E-03	7	9,56E-02
HCl	2,29E-06	1,44E-06	1,44E-06	3	2,29E-06
HF	3,44E-08	1,72E-08	1,72E-08	1	3,44E-08
N2O	2,08E-06	1,04E-06	1,47E-06	2	2,08E-06
NH3	1,97E-08	9,87E-09	9,87E-09	1	1,97E-08
NMVOC	2,16E-04	1,14E-04	1,14E-04	1	2,16E-04
NOx	2,44E-04	2,75E-05	6,15E-05	5	2,44E-04
SO2	1,31E-03	3,13E-04	8,29E-04	7	1,31E-03
Staub	9,98E-05	4,99E-05	4,99E-05	1	9,98E-05

¹⁾ Bereitstellungsaufwand von 0,21 MJ/MJ als Einzelwert mit Schätzfehler versehen.
²⁾ Erläuterungen finden sich in Abschnitt 4.2.5.

Tabelle D.4: Spezifische Prozeßdaten der Industriefeuerung „Heizöl extra leicht“. Alle Angaben beziehen sich auf 1 MJ verbrannten Energieträger.

	<x>	m	s	n	Frisknecht
Energieträger	MJ/MJ	MJ/MJ	MJ/MJ		MJ/MJ
Steinkohle	-	-	-	0	-
Erdgas	-	-	-	0	-
Öl ¹⁾	1,08E+00	4,19E-02	4,19E-02	1	1,08E+00
Em. in Luft ²⁾	kg/MJ	kg/MJ	kg/MJ		kg/MJ
C2F6	-	-	-	0	-
CF4	-	-	-	0	-
CH4	1,03E-04	2,31E-05	2,31E-05	3	1,03E-04
CO	2,81E-05	1,41E-05	1,41E-05	1	2,81E-05
CO2	8,43E-02	4,54E-04	1,11E-03	6	8,43E-02
HCl	3,29E-07	2,06E-07	2,06E-07	3	3,29E-07
HF	3,44E-08	1,72E-08	1,72E-08	1	3,44E-08
N2O	8,75E-07	4,37E-07	4,37E-07	1	8,75E-07
NH3	9,50E-09	4,75E-09	4,75E-09	1	9,50E-09
NMVOC	1,93E-04	1,02E-04	1,02E-04	1	1,93E-04
NOx	1,24E-04	1,62E-05	2,80E-05	3	1,24E-04
SO2	1,31E-04	3,07E-05	6,14E-05	4	1,31E-04
Staub	4,26E-05	2,13E-05	2,13E-05	1	4,26E-05

¹⁾ Bereitstellungsaufwand von 0,08 MJ/MJ als Einzelwert mit Schätzfehler versehen.
²⁾ Erläuterungen finden sich in Abschnitt 4.2.5.

D.2 Elektrische Energie

Die Standardabweichungen des Primärenergiebedarfs zur Bereitstellung elektrischer Energie über Steinkohlekraftwerke wird auf Basis der Kohleaufbereitung sowie der Mittelung über die UCPTE Staaten abgeschätzt.

Für die Aufbereitung ergibt sich der bereits in Abschnitt D.1 diskutierte Wert

$$(1,60 \pm 0,26) \text{ kg/kg}$$

für den Rohkohlebedarf.

Im Vergleich der länderspezifischen Werte für die Primärenergie schlagen die unterschiedlichen Wirkungsgrade sowie Kohlearten zu Buche. Gewichtete Mittelung liefert hier

$$\begin{aligned} m &= 0,218, \\ s &= 0,616. \end{aligned}$$

Die beiden Ursachen für den Primärenergiebedarf sind multiplikativ verknüpft. Eine entsprechende Fehlerfortpflanzung liefert die in Tabelle D.5 angegebenen Werte. Im Gegensatz zur Steinkohle findet im Falle der Braunkohle keine Aufbereitung statt. Die Abschätzung der Standardabweichungen für den Primärenergiebedarf erfolgt daher durch gewichtete Mittelung über die länderspezifischen Werte. Der Primärenergiebedarf für die Bereitstellung elektrischer Energie aus Gaskraftwerken wird maßgeblich durch die Verluste in Förderung, Aufbereitung und Transport bestimmt sowie durch den Nutzungsgrad der Kraftwerke.

Die Verluste wurden bereits in Abschnitt D.1 diskutiert und die Ergebnisse in Tabelle D.2 bereitgestellt. Die landesspezifischen Wirkungsgrade der Gaskraftwerke wurden [33] entnommen und deren Streuung durch gewichtete Mittelung in Tabelle D.7 bestimmt. Für den Primärenergiebedarf der Kraftwerke ergibt sich im Mittel

$$2,632 \text{ MJ/MJ}$$

mit

$$\begin{aligned} m &= 0,047 \text{ MJ/MJ}, \\ s &= 0,125 \text{ MJ/MJ}. \end{aligned}$$

Die Effekte hängen multiplikativ zusammen. Eine entsprechende Fehlerfortpflanzung liefert aus den obigen und den in Tabelle D.2 ausgewiesenen Werten die Angaben in Tabelle D.8. Die Streuung des Primärenergiebedarfs ist in [33] wesentlich durch den elektrischen Wirkungsgrad bestimmt, da die Aufbereitung einheitlich in einer Modellraffinerie stattfindet. Die gewichtete Mittelung über länderspezifische Wirkungsgrade zeigt Tabelle D.9. Für den Primärenergiebedarf der Kraftwerke ergibt sich damit

$$2,693 \text{ MJ/MJ}$$

mit

$$\begin{aligned} m &= 0,028 \text{ MJ/MJ}, \\ s &= 0,090 \text{ MJ/MJ}. \end{aligned}$$

Übertragung der relativen Standardabweichungen auf den von [33] angegebenen Mittelwert ergibt die in Tabelle D.10 dokumentierten Werte.

Tabelle D.5: Spezifische Moduldaten der Bereitstellung elektrischer Energie aus Steinkohlekraftwerken. Alle Angaben beziehen sich auf 1 MJ elektrische Energie.

	Wichtung ¹⁾				1,32E-02	5,71E-02	4,57E-01	9,53E-02	1,01E-01
	<x>	m	s	n	A	B	D(W)	F	I
Energieträger	MJ/MJ	MJ/MJ	MJ/MJ		MJ/MJ	MJ/MJ	MJ/MJ	MJ/MJ	MJ/MJ
Strom	-1,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1	-	-	-	-	-
Steinkohle ¹⁾	4,55E+00	1,24E+00	1,54E+00	9	4,60E+00	4,74E+00	4,20E+00	4,55E+00	4,50E+00
Braunkohle	-	-	-	0	-	-	-	-	-
Erdgas	-	-	-	0	-	-	-	-	-
Öl	-	-	-	0	-	-	-	-	-
Eprim aus Uran	-	-	-	0	-	-	-	-	-
Pot. En. Wasser	-	-	-	0	-	-	-	-	-
Em. in Luft ²⁾	kg/MJ	kg/MJ	kg/MJ		kg/MJ	kg/MJ	kg/MJ	kg/MJ	kg/MJ
C2F6	-	-	-	0	-	-	-	-	-
CF4	-	-	-	0	-	-	-	-	-
CH4	1,89E-06	1,90E-07	6,29E-07	12	2,16E-06	1,59E-06	2,21E-06	1,39E-06	1,84E-06
CO	5,72E-06	9,65E-08	2,73E-07	9	6,09E-06	5,42E-06	5,97E-06	5,29E-06	5,70E-06
CO2	2,70E-01	2,70E-03	7,65E-03	9	2,81E-01	2,87E-01	2,64E-01	2,69E-01	2,79E-01
HCl	8,18E-05	9,77E-06	2,76E-05	9	1,10E-05	4,69E-05	1,04E-04	1,04E-04	4,88E-05
HF	8,72E-06	2,58E-06	7,28E-06	9	4,51E-06	1,30E-05	2,85E-06	9,43E-06	1,11E-05
N2O	1,72E-06	2,07E-08	5,86E-08	9	1,79E-06	1,83E-06	1,67E-06	1,72E-06	1,78E-06
NH3	1,60E-06	3,35E-07	9,49E-07	9	3,21E-06	6,15E-07	2,38E-06	1,61E-07	2,12E-06
NMVOC	2,98E-05	3,96E-06	1,12E-05	9	5,19E-05	4,22E-05	1,97E-05	3,18E-05	4,97E-05
NOx	5,32E-04	1,04E-04	2,94E-04	9	3,92E-04	1,02E-03	3,71E-04	1,03E-03	7,15E-04
SO2	1,11E-03	3,26E-04	9,23E-04	9	4,18E-04	1,59E-03	4,43E-04	1,74E-03	1,01E-03
Staub	3,69E-04	1,05E-04	2,96E-04	9	6,54E-04	6,30E-04	7,50E-05	3,90E-04	5,81E-04
Energieträger					8,55E-02	3,01E-02	1,58E-01	2,60E-03	
					NL	P	E	ExJU	
					MJ/MJ	MJ/MJ	MJ/MJ	MJ/MJ	
Strom					-	-	-	-	
Steinkohle					3,87E+00	4,50E+00	5,88E+00	5,52E+00	
Braunkohle					-	-	-	-	
Erdgas					-	-	-	-	
Öl					-	-	-	-	
Eprim aus Uran					-	-	-	-	
Pot. En. Wasser					-	-	-	-	
Em. in Luft ¹⁾					kg/MJ	kg/MJ	kg/MJ	kg/MJ	
C2F6					-	-	-	-	
CF4					-	-	-	-	
CH4					1,77E-06	1,42E-06	1,54E-06	1,41E-06	
CO					5,68E-06	5,31E-06	5,41E-06	5,30E-06	
CO2					2,65E-01	2,77E-01	2,77E-01	3,22E-01	
HCl					3,83E-05	1,07E-04	6,21E-05	1,20E-04	
HF					4,61E-06	1,93E-05	2,26E-05	1,65E-05	
N2O					1,67E-06	1,76E-06	1,79E-06	2,05E-06	
NH3					1,64E-06	2,16E-07	3,57E-07	1,44E-07	
NMVOC					4,29E-05	4,64E-05	2,87E-05	2,56E-05	
NOx					7,50E-04	1,05E-03	1,83E-04	1,57E-03	
SO2					6,89E-04	2,18E-03	2,45E-03	1,11E-02	
Staub					5,11E-04	4,97E-04	8,47E-04	7,63E-04	

¹⁾ Die Bestimmung der Standardabweichungen wird im Text erläutert.

²⁾ Bestimmung der Streuungsmaße durch gewichtete Mittelung, bei Einzelwerten erfolgt eine Abschätzung wie in Abschnitt 4.2.5 diskutiert.

³⁾ Wichtung gemäß Anteil an Strombereitstellung zum UCPTB-Netz 1990.

Tabelle D.6: Spezifische Moduldaten der Bereitstellung elektrischer Energie aus Braunkohlekraftwerken. Alle Angaben beziehen sich auf 1 MJ elektrische Energie.

	Wichtung ²⁾				1,40E-02	4,66E-01	1,48E-02	1,41E-01
	<x>	m	s	n	A	D(W)	F	GR
Energieträger	MJ/MJ	MJ/MJ	MJ/MJ		MJ/MJ	MJ/MJ	MJ/MJ	MJ/MJ
Strom	-1,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1	-	-	-	-
Steinkohle	-	-	-	0	-	-	-	-
Braunkohle	3,41E+00	2,92E-01	7,16E-01	7	2,37E+00	3,10E+00	3,09E+00	5,13E+00
Erdgas	-	-	-	0	-	-	-	-
Öl	-	-	-	0	-	-	-	-
Eprim aus Uran	-	-	-	0	-	-	-	-
Pot. En. Wasser	-	-	-	0	-	-	-	-
Em. in Luft ¹⁾	kg/MJ	kg/MJ	kg/MJ		kg/MJ	kg/MJ	kg/MJ	kg/MJ
C2F6	-	-	-	0	-	-	-	-
CF4	-	-	-	0	-	-	-	-
CH4	6,51E-05	2,24E-05	5,01E-05	5	5,39E-05	6,82E-05	6,77E-05	4,13E-05
CO	3,75E-05	1,48E-06	3,61E-06	7	3,42E-05	3,44E-05	3,43E-05	4,13E-05
CO2	3,70E-01	1,65E-02	4,05E-02	7	3,15E-01	3,38E-01	3,30E-01	4,33E-01
HCl	5,98E-05	2,16E-05	5,30E-05	7	9,14E-07	9,74E-06	4,32E-05	1,51E-04
HF	6,22E-06	1,68E-06	4,12E-06	7	3,59E-07	2,47E-06	4,56E-06	1,36E-05
N2O	1,89E-06	7,61E-08	1,86E-07	7	1,65E-06	1,73E-06	1,73E-06	2,11E-06
NH3	1,43E-07	8,80E-08	2,16E-07	7	1,72E-06	2,33E-07	1,68E-08	2,62E-08
NMVOC	6,93E-06	4,83E-07	1,18E-06	7	5,83E-06	6,36E-06	6,30E-06	9,77E-06
NOx	5,42E-04	1,18E-04	2,88E-04	7	2,53E-04	2,60E-04	4,24E-04	6,54E-04
SO2	1,85E-03	1,51E-03	3,70E-03	7	3,45E-04	1,46E-04	1,44E-03	2,22E-03
Staub	5,76E-04	8,92E-05	2,18E-04	7	4,76E-04	4,04E-04	6,46E-04	4,25E-04
					6,60E-03	6,48E-02	2,92E-01	
Energieträger					I	E	ExJU	
					MJ/MJ	MJ/MJ	MJ/MJ	
Strom					-	-	-	
Steinkohle					-	-	-	
Braunkohle					3,16E+00	2,70E+00	3,31E+00	
Erdgas					-	-	-	
Öl					-	-	-	
Eprim aus Uran					-	-	-	
Pot. En. Wasser					-	-	-	
Em. in Luft ¹⁾					kg/MJ	kg/MJ	kg/MJ	
C2F6					-	-	-	
CF4					-	-	-	
CH4					6,92E-05	5,99E-05	7,32E-05	
CO					3,43E-05	3,40E-05	4,18E-05	
CO2					3,41E-01	3,23E-01	4,06E-01	
HCl					5,15E-05	6,98E-05	9,71E-05	
HF					5,46E-06	6,43E-06	8,98E-06	
N2O					1,74E-06	1,72E-06	2,10E-06	
NH3					1,71E-08	1,51E-08	1,83E-08	
NMVOC					6,40E-06	5,83E-06	6,79E-06	
NOx					5,89E-04	7,46E-04	9,12E-04	
SO2					2,24E-03	1,56E-02	1,44E-03	
Staub					5,83E-04	7,30E-04	8,91E-04	

¹⁾ Bestimmung der Streuungsmaße durch gewichtete Mittelung, bei Einzelwerten erfolgt eine Abschätzung wie in Abschnitt 4.2.5 diskutiert. ²⁾ Wichtung gemäß Anteil an Strombereitstellung zum UCPTE-Netz 1990.

Tabelle D.7: Länderspezifischer elektrischer Wirkungsgrad von Brenngaskraftwerken nach [33]

Land	<x>	m	s	n	A	B	D(W)	F	I	NL	E	ExJU
UCPTE					5,00E-02	5,00E-02	2,90E-01	4,00E-02	2,70E-01	2,60E-01	2,00E-02	2,00E-02
η _d	3,80E-01	6,80E-03	1,80E-02	8	3,60E-01	3,30E-01	3,80E-01	3,90E-01	3,90E-01	3,90E-01	3,30E-01	3,20E-01

Tabelle D.8: Spezifische Moduldaten der Bereitstellung elektrischer Energie aus Brenngaskraftwerken. Alle Angaben beziehen sich auf 1 MJ elektrische Energie.

	Wichtung ³⁾				5,00E-02	5,00E-02	2,90E-01	4,00E-02	2,70E-01
	<x>	m	s	n	A	B	D(W)	F	I
Energieträger	MJ/MJ	MJ/MJ	MJ/MJ		MJ/MJ	MJ/MJ	MJ/MJ	MJ/MJ	MJ/MJ
Strom	-1,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1	-	-	-	-	-
Steinkohle	-	-	-	0	-	-	-	-	-
Braunkohle	-	-	-	0	-	-	-	-	-
Erdgas ¹⁾	2,34E+00	1,11E-01	2,58E-01	6	-	-	-	-	-
Öl	-	-	-	0	-	-	-	-	-
Eprim aus Uran	-	-	-	0	-	-	-	-	-
Pot. En. Wasser	-	-	-	0	-	-	-	-	-
Em. in Luft²⁾	kg/MJ	kg/MJ	kg/MJ		kg/MJ	kg/MJ	kg/MJ	kg/MJ	kg/MJ
C2F6	-	-	-	0	-	-	-	-	-
CF4	-	-	-	0	-	-	-	-	-
CH4	4,21E-04	1,05E-04	2,28E-04	1	-	-	-	-	-
CO	7,64E-05	3,82E-05	3,82E-05	1	-	-	-	-	-
CO2	2,08E-01	2,77E-02	7,33E-02	8	1,67E-01	3,21E-01	2,13E-01	4,87E-01	1,54E-01
HCl	2,78E-07	1,39E-07	1,39E-07	1	-	-	-	-	-
HF	2,74E-08	1,37E-08	1,37E-08	1	-	-	-	-	-
N2O	1,54E-06	7,71E-07	7,71E-07	1	-	-	-	-	-
NH3	6,81E-08	3,41E-08	3,41E-08	1	-	-	-	-	-
NMVOC	2,08E-05	5,17E-06	1,13E-05	1	-	-	-	-	-
NOx	4,21E-04	7,01E-05	1,86E-04	8	2,58E-04	2,24E-04	3,66E-04	1,64E-04	7,03E-04
SO2	9,41E-05	1,21E-05	3,20E-05	8	7,64E-05	1,42E-04	9,74E-05	2,15E-04	7,03E-05
Staub	5,55E-05	2,78E-05	2,78E-05	1	-	-	-	-	-
					2,60E-01	2,00E-02	2,00E-02		
					NL	E	ExJU	Einzelwert	
Energieträger					MJ/MJ	MJ/MJ	MJ/MJ	MJ/MJ	
Strom					-	-	-	-	
Steinkohle					-	-	-	-	
Braunkohle					-	-	-	-	
Erdgas ¹⁾					-	-	-	2,34E+00	
Öl					-	-	-	-	
Eprim aus Uran					-	-	-	-	
Pot. En. Wasser					-	-	-	-	
Em. in Luft²⁾					kg/MJ	kg/MJ	kg/MJ	kg/MJ	
C2F6					-	-	-	-	
CF4					-	-	-	-	
CH4					-	-	-	4,21E-04	
CO					-	-	-	7,64E-05	
CO2					1,91E-01	3,87E-01	1,88E-01	(n) 2,09E-01	
HCl					-	-	-	2,78E-07	
HF					-	-	-	2,74E-08	
N2O					-	-	-	1,54E-06	
NH3					-	-	-	6,81E-08	
NMVOC					-	-	-	2,08E-05	
NOx					2,77E-04	6,12E-04	4,97E-04	(n) 4,16E-04	
SO2					8,51E-05	1,73E-04	8,59E-05	(n) 9,16E-05	
Staub					-	-	-	5,55E-05	

¹⁾ Zur Bestimmung der Standardabweichungen siehe Text.

²⁾ Bestimmung der Streuungsmaße durch gewichtete Mittelung, bei Einzelwerten erfolgt eine Abschätzung wie in Abschnitt 4.2.5 diskutiert.

³⁾ Wichtung gemäß Anteil an Strombereitstellung zum UCPTB-Netz 1990.

Tabelle D.9: Länderspezifischer elektrischer Wirkungsgrad von Ölkraftwerken nach [33]

Land	<x>	m	s	n	A	B	Ch	F	D(W)	GR
Land										
η_{el}	3,71E-01	3,92E-03	1,24E-02	11	3,78E-01	3,54E-01	3,70E-01	3,47E-01	3,70E-01	3,40E-01
UCPTE					1,40E-02	8,00E-03	4,00E-03	5,60E-02	6,80E-02	4,80E-02
Land					I	NL	P	B	ExJU	-
η_{el}					3,79E-01	3,69E-01	3,59E-01	3,51E-01	3,65E-01	-
UCPTE					6,50E-01	2,00E-02	5,90E-02	5,30E-02	2,10E-02	-

Tabelle D.10: Spezifische Moduldaten der Bereitstellung elektrischer Energie aus Ölkraftwerken. Alle Angaben beziehen sich auf 1 MJ elektrische Energie.

	Wichtung ¹⁾				1,30E-02	9,00E-03	6,80E-02	6,00E-02	5,30E-02	6,35E-01
	<x>	m	s	n	A	B	D(W)	F	GR	I
Energieträger	MJ/MJ	MJ/MJ	MJ/MJ		MJ/MJ	MJ/MJ	MJ/MJ	MJ/MJ	MJ/MJ	MJ/MJ
Strom	-1,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1	-	-	-	-	-	-
Steinkohle	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-
Braunkohle	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-
Erdgas	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-
Öl ¹⁾	3,04E+00	3,21E-02	1,01E-01	11	-	-	-	-	-	-
Eprim aus Uran	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-
Pot. En. Wasser	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-
Em. in Luft ²⁾	kg/MJ	kg/MJ	kg/MJ		kg/MJ	kg/MJ	kg/MJ	kg/MJ	kg/MJ	kg/MJ
C2F6	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-
CF4	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-
CH4	3,08E-04	1,38E-04	1,38E-04	3	-	-	-	-	-	-
CO	6,33E-05	1,07E-05	2,62E-05	6	-	-	-	-	-	-
CO2	2,60E-01	6,96E-03	2,09E-02	10	2,42E-01	2,58E-01	2,46E-01	2,66E-01	2,72E-01	2,54E-01
HCl	2,81E-06	1,76E-06	3,06E-06	3	-	-	-	-	-	-
HF	2,84E-07	1,42E-07	1,42E-07	1	-	-	-	-	-	-
N2O	5,34E-06	2,21E-06	5,41E-06	6	-	-	-	-	-	-
NH3	2,15E-07	1,07E-07	1,07E-07	1	-	-	-	-	-	-
NMVOC	5,59E-04	2,96E-04	2,96E-04	3	-	-	-	-	-	-
NOx	6,02E-04	4,43E-05	1,33E-04	10	2,60E-04	8,09E-04	6,02E-04	7,40E-04	5,50E-04	5,36E-04
SO2	2,42E-03	4,51E-04	1,35E-03	10	7,42E-05	2,10E-03	1,62E-03	4,16E-03	5,77E-03	1,72E-03
Staub	8,05E-05	2,93E-05	8,79E-05	10	7,95E-06	1,42E-05	2,16E-05	6,91E-05	2,94E-04	5,28E-05
Energieträger					2,00E-02	6,10E-02	5,50E-02	2,20E-02		
					NL	P	E	ExJU	Einzelwerte	
					MJ/MJ	MJ/MJ	MJ/MJ	MJ/MJ	MJ/MJ	
Strom					-	-	-	-	-	
Steinkohle					-	-	-	-	-	
Braunkohle					-	-	-	-	-	
Erdgas					-	-	-	-	-	
Öl ¹⁾					-	-	-	-	-	
Eprim aus Uran					-	-	-	-	-	
Pot. En. Wasser					-	-	-	-	-	
Em. in Luft ²⁾					kg/MJ	kg/MJ	kg/MJ	kg/MJ	kg/MJ	
C2F6					-	-	-	-	-	
CF4					-	-	-	-	-	
CH4					-	-	-	-	3,08E-04	
CO					-	-	-	-	6,33E-05	
CO2					2,47E-01	2,58E-01	3,43E-01	2,54E-01	(n) 2,42E-01	
HCl					-	-	-	-	2,81E-06	
HF					-	-	-	-	2,84E-07	
N2O					-	-	-	-	5,34E-06	
NH3					-	-	-	-	2,15E-07	
NMVOC					-	-	-	-	5,59E-04	
NOx					7,18E-04	8,45E-04	9,74E-04	6,74E-04	(n) 5,43E-04	
SO2					1,82E-03	4,12E-03	5,21E-03	2,82E-03	(n) 2,55E-03	
Staub					1,36E-05	3,26E-04	7,41E-06	2,11E-04	(n) 1,89E-04	

¹⁾ Zur Bestimmung von Mittelwert und Standardabweichungen siehe Text.

²⁾ Bestimmung der Streuungsmaße durch gewichtete Mittelung, bei Einzelwerten erfolgt eine Abschätzung wie in Abschnitt 4.2.5 diskutiert.

³⁾ Wichtung für Emissionen gemäß Anteil an Strombereitstellung zum UCPTE-Netz 1990.

Tabelle D.11: Spezifische Moduldaten der Bereitstellung elektrischer Energie aus Kernkraftwerken. Alle Angaben beziehen sich auf 1 MJ elektrische Energie.

	Wichtung				9,00E-01	1,00E-01
	<x>	m	s	n	DWR ¹⁾	SWR ²⁾
Energieträger	MJ/MJ	MJ/MJ	MJ/MJ		MJ/MJ	MJ/MJ
Strom	-1,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1	-	-
Steinkohle	-	-	-	0	-	-
Braunkohle	-	-	-	0	-	-
Erdgas	-	-	-	0	-	-
Öl	-	-	-	0	-	-
Eprim aus Uran	3,22E+00	6,20E-03	6,20E-03	2	3,23E+00	3,21E+00
Pot. En. Wasser	-	-	-	0	-	-
Em. in Luft ¹⁾	kg/MJ	kg/MJ	kg/MJ		kg/MJ	kg/MJ
C2F6	-	-	-	0	-	-
CF4	-	-	-	0	-	-
CH4	5,71E-06	2,86E-06	2,86E-06	1	5,62E-06	5,80E-06
CO	2,64E-06	1,32E-06	1,32E-06	1	2,65E-06	2,64E-06
CO2	2,27E-03	1,14E-03	1,14E-03	1	2,25E-03	2,29E-03
HCl	1,46E-07	7,29E-08	7,29E-08	1	1,39E-07	1,53E-07
HF	3,03E-08	1,52E-08	1,52E-08	1	3,73E-08	2,33E-08
N2O	6,66E-08	3,33E-08	3,33E-08	1	6,52E-08	6,79E-08
NH3	1,30E-07	6,50E-08	6,50E-08	1	1,33E-07	1,27E-07
NMVOC	3,53E-06	1,77E-06	1,77E-06	1	3,56E-06	3,50E-06
NOx	9,01E-06	4,50E-06	4,50E-06	1	8,95E-06	9,06E-06
SO2	1,69E-05	8,43E-06	8,43E-06	1	1,72E-05	1,65E-05
Staub	2,35E-05	1,18E-05	1,18E-05	1	2,28E-05	2,43E-05

¹⁾ Mittelwert gebildet, aber mit Schätzfehler versehen (siehe Abschnitt 4.2.5).

²⁾ Druckwasserreaktor ²⁾ Siedewasserreaktor

Tabelle D.12: Spezifische Moduldaten der Bereitstellung elektrischer Energie aus Wasserkraftwerken. Alle Angaben beziehen sich auf 1 MJ elektrische Energie.

	Wichtung				9,00E-01	1,00E-01
	<x>	m	s	n	Laufkraft	Speicherkraft
Energieträger	MJ/MJ	MJ/MJ	MJ/MJ		MJ/MJ	MJ/MJ
Strom	-1,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1	-	-
Steinkohle	-	-	-	0	-	-
Braunkohle	-	-	-	0	-	-
Erdgas	-	-	-	0	-	-
Öl	-	-	-	0	-	-
Eprim aus Uran	-	-	-	0	-	-
Pot. En. Wasser	1,23E+00	3,60E-02	3,60E-02	2	1,22E+00	1,34E+00
Em. in Luft ¹⁾	kg/MJ	kg/MJ	kg/MJ		kg/MJ	kg/MJ
C2F6	-	-	-	0	-	-
CF4	-	-	-	0	-	-
CH4	2,44E-06	1,22E-06	1,22E-06	1	2,20E-06	2,68E-06
CO	9,19E-07	4,60E-07	4,60E-07	1	1,02E-06	8,17E-07
CO2	1,10E-03	5,52E-04	5,52E-04	1	1,03E-03	1,18E-03
HCl	4,93E-08	2,47E-08	2,47E-08	1	4,03E-08	5,83E-08
HF	5,38E-09	2,69E-09	2,69E-09	1	4,40E-09	6,37E-09
N2O	1,62E-08	8,12E-09	8,12E-09	1	1,44E-08	1,81E-08
NH3	5,80E-09	2,90E-09	2,90E-09	1	3,02E-09	8,59E-09
NMVOC	1,03E-06	5,16E-07	5,16E-07	1	1,17E-06	8,94E-07
NOx	4,27E-06	2,14E-06	2,14E-06	1	4,57E-06	3,97E-06
SO2	3,05E-06	1,53E-06	1,53E-06	1	2,70E-06	3,40E-06
Staub	6,75E-05	3,38E-05	3,38E-05	1	6,36E-05	7,14E-05

¹⁾ Mittelwert gebildet und mit Schätzfehler versehen (siehe Abschnitt 4.2.5).

Anhang E

Bilanz von Herstellung und Entsorgung

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Berechnungen für Herstellung und Entsorgung dokumentiert. Die Werte für die Nutzungsphase finden sich in den Tabellen 4.13 und 4.14 (S. 77/78). Es werden nur die Ergebnisse für die Mittelklasse ausgewiesen. Die Resultate für die anderen Fahrzeugklassen unterscheiden sich um einen konstanten Faktor, entsprechend dem Verhältnis der Rohkarosseriemassen. Für die Kleinwagen ergibt sich ein Multiplikator von

$$\frac{M_{\text{Kleinwagen}}}{M_{\text{Mittelklasse}}} = \frac{270 \text{ kg}}{310 \text{ kg}} \approx 0,87$$

und für die Oberklasse von

$$\frac{M_{\text{Oberklasse}}}{M_{\text{Mittelklasse}}} = \frac{360 \text{ kg}}{310 \text{ kg}} \approx 1,16.$$

Da die Massen als fixe Parameter ohne Streuung in die Bilanz eingehen (siehe Diskussion in Kapitel 5, S. 122), kommt die Nichtlinearität des Fehlerfortpflanzungsgesetzes nicht zum tragen. Die Standardabweichungen für Kleinwagen und Oberklasse lassen sich daher in gleicher Weise durch Multiplikation mit dem Massenverhältnis berechnen. Die Anordnung richtet sich nach der Antriebsart und für gleiche Antriebsarten nach den Szenarien „Basis“, „günstig“ und „ungünstig“. Die Definition der Szenarien wird in Kapitel 5 gegeben, eine Übersicht findet sich in Tabelle 5.2 auf S. 110.

Die Tabellen beginnen mit der Rubrik „Prozeßwichtung“, in der das Gewicht der Einzelprozesse innerhalb der Prozeßkette nach Abschnitt 2.2 angegeben wird.

In der Rubrik „Energieträger“ wird der nach Abschnitt 4.2.5 primärenergetisch bewertete Energieträgerbedarf ausgewiesen. Die Vorzeichenregelung orientiert sich an dem Begriff Bedarf. Demzufolge entsprechen positive Werte Prozeßeinträgen, negative Prozeßausgängen.

In der Rubrik „Materialbedarf“ werden die berücksichtigten Roh- und Hilfsstoffe verzeichnet. Es werden auch Stoffe angeführt die ausschliesslich in internen Strömen auftreten und

demzufolge in der Gesamtbilanz verschwinden. Die Verknüpfung der Prozesse ist damit nachvollziehbar dokumentiert. Die Vorzeichenregelung erfolgt analog zur Rubrik „Energieträger“.

In der Rubrik „Em. in Luft“ werden die nach Abschnitt 4.1 ausgewählten luftseitigen Emissionen betrachtet. Positive Werte stellen in dieser Rubrik Prozeßgänge dar.

In den ausgewiesenen Werten der Teilprozeßketten ist die Mittelung mit den umfaßten Einzelprozessen bereits enthalten. Zur Bilanzsumme tragen daher nur die in den Spalten der Teilprozeßketten verzeichneten Werte, nicht jedoch die der eingeschlossenen Einzelprozesse bei. Welche Prozesse auf diese Weise bereits erfaßt sind, wird in Fußnoten erläutert. Die Angaben werden nach den einzelnen Prozessschritten aufgeschlüsselt um ihren Anteil an der Gesamtbilanz ohne Berücksichtigung der Teilprozeßketten zu verdeutlichen.

Konventionelle Stahlrohrkarosserie im Szenario „Basis“

Tabelle E.1: Gesamtbilanz aufgeschlüsselt nach Einzelprozessen der Herstellung und Entsorgung einer Stahlrohrkarosserie eines Mittelklasse-Pkw, für das Szenario „Basis“. Angegeben sind Mittelwert $\langle x \rangle$, Standardabweichung des Mittelwertes m , Standardabweichung s sowie bei Teilprozessketten der mittlere Stichprobenumfang $\langle n \rangle$. (Teil 1)

				Erzabbau			Pelletieren		
	$\langle x \rangle$	m	s	$\langle x \rangle$	m	s	$\langle x \rangle$	m	s
Prozessleistung				4,89E+02	2,94E+01	7,11E+01	1,53E+02	4,20E+01	1,11E+02
Energieträger	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ
Steinkohle	1,38E+04	1,90E+03	2,75E+03	5,71E+01	2,68E+01	6,08E+01	5,50E+01	2,45E+01	6,97E+01
Braunkohle	3,98E+02	3,48E+01	6,40E+01	-	-	-	-	-	-
Erdgas	1,26E+03	1,69E+02	3,90E+02	-	-	-	3,36E+01	2,14E+01	6,61E+01
Öl	2,81E+03	4,81E+02	6,69E+02	2,94E+01	8,43E+00	1,70E+01	7,22E+01	3,15E+01	9,34E+01
Erz aus Uran ¹⁾	1,94E+03	1,59E+02	2,65E+02	-	-	-	-	-	-
Pot. En. Wasser	3,02E+02	2,50E+01	4,13E+01	-	-	-	-	-	-
Gichtgas	-1,30E+03	1,61E+02	4,57E+02	-	-	-	-	-	-
Koksgas	1,00E+03	2,80E+02	5,71E+02	-	-	-	-	-	-
-	-1,33E+03	8,34E+01	2,52E+02	-	-	-	-	-	-
Konvertergas	-2,78E+02	6,40E+01	1,44E+02	-	-	-	-	-	-
Materialbedarf	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg
Bauxit ¹⁾	4,25E+00	2,14E+00	2,18E+00	-	-	-	-	-	-
Bentonit ¹⁾	1,55E+00	9,14E-01	1,97E+00	-	-	-	1,55E+00	9,14E-01	1,97E+00
Brannkalk	0,00E+00	7,15E+00	1,11E+01	-	-	-	2,45E+00	1,40E+00	2,15E+00
Eisenerz	0,00E+00	2,94E+01	7,11E+01	4,89E+02	2,94E+01	7,11E+01	- ²⁾	-	-
Sinter	0,00E+00	5,20E+01	1,35E+02	-	-	-	-	-	-
Pellets	0,00E+00	5,94E+01	1,57E+02	-	-	-	-1,53E+02	4,20E+01	1,11E+02
Elektrode	0,00E+00	5,81E-02	1,20E-01	-	-	-	-	-	-
H2SO4 ¹⁾	1,44E+01	7,93E+00	1,36E+01	-	-	-	-	-	-
Kalkstein	1,60E+02	8,95E+00	1,54E+01	-	-	-	- ²⁾	-	-
Karosserie ²⁾	0,00E+00	2,19E+02	2,19E+02	-	-	-	-	-	-
Legierungen ¹⁾	3,17E+00	1,17E+00	1,23E+00	-	-	-	-	-	-
Pech ¹⁾	5,30E-02	2,77E-02	3,15E-02	-	-	-	-	-	-
Petrolkoks ¹⁾	2,12E-01	1,11E-01	1,26E-01	-	-	-	-	-	-
Robeisen	0,00E+00	2,83E+01	6,94E+01	-	-	-	-	-	-
Robereisen	1,14E+03	1,68E+02	4,42E+02	1,14E+03	1,68E+02	4,42E+02	-	-	-
Rohtahl	0,00E+00	3,07E+01	7,36E+01	-	-	-	-	-	-
Sauerstoff ¹⁾	5,22E+01	8,80E+00	1,48E+01	-	-	-	-	-	-
Schlacke u.ä. ¹⁾	3,65E+01	1,41E+01	1,63E+01	-	-	-	-	-	-
Schrott	2,66E+01	3,31E+01	6,69E+01	-	-	-	-	-	-
Shredderschrott	-2,79E+02	1,40E+02	1,40E+02	-	-	-	-	-	-
Stahlblech	0,00E+00	1,06E+01	3,89E+01	-	-	-	-	-	-
Stahlbl. gepr. ²⁾	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-	-	-	-	-	-
Vorbrammen	0,00E+00	2,68E+01	6,39E+01	-	-	-	-	-	-
Walzöl ¹⁾	5,97E-01	1,91E-01	3,32E-01	-	-	-	-	-	-
Warmband	0,00E+00	2,27E+01	5,60E+01	-	-	-	-	-	-
Zuschläge ¹⁾	6,23E+01	2,51E+01	3,01E+01	-	-	-	-	-	-
Ausbruch	-8,76E+00	1,72E+00	1,95E+00	-	-	-	-	-	-
Auswurf	-5,80E+00	2,91E+00	2,98E+00	-	-	-	-	-	-
Robbenzol	-1,83E+00	2,94E-01	6,98E-01	-	-	-	-	-	-
Rohteer	-7,62E+00	6,96E-01	1,85E+00	-	-	-	-	-	-
Schlacke	-1,60E+02	1,16E+01	3,70E+01	-	-	-	-	-	-
Stäube	-1,56E+01	5,46E+00	9,43E+00	-	-	-	-	-	-
Walzzunder	-1,12E+01	3,92E+00	1,08E+01	-	-	-	-	-	-
Schlamm ¹⁾	-4,08E+00	1,12E+00	2,27E+00	-	-	-	-	-	-
Em. in Luft	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg
C2F6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CP4	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CH4	3,31E+00	1,28E+00	1,39E+00	6,81E-03	3,78E-03	7,20E-03	2,48E-02	9,13E-03	2,51E-02
CO	8,48E+00	1,52E+00	2,95E+00	4,49E-02	2,53E-02	3,43E-02	6,11E-03	2,88E-03	6,59E-03
CO2	1,19E+03	6,25E+01	1,02E+02	1,35E+01	6,32E+00	1,27E+01	1,28E+01	4,03E+00	1,10E+01
HCl	9,60E-02	1,67E-02	2,24E-02	1,82E-03	9,42E-04	1,93E-03	1,86E-03	1,21E-03	3,01E-03
HF	7,71E-03	1,34E-03	2,56E-03	1,93E-04	1,07E-04	2,31E-04	9,27E-05	4,95E-05	1,26E-04
N2O	6,56E-03	9,39E-04	1,44E-03	1,09E-04	5,97E-05	1,23E-04	2,02E-04	9,70E-05	2,21E-04
NH3	1,96E-02	1,14E-02	4,39E-02	3,49E-05	1,86E-05	3,87E-05	1,03E-05	3,65E-06	9,59E-06
NM VOC	4,13E-01	6,42E-02	1,09E-01	6,47E-03	4,42E-03	7,19E-03	1,57E-02	9,93E-03	2,17E-02
NOx	2,11E+00	3,55E-01	4,21E-01	1,86E-01	1,00E-01	1,43E-01	2,77E-02	9,77E-03	2,70E-02
SO2	3,69E+00	5,43E-01	7,85E-01	6,74E-02	3,49E-02	7,33E-02	1,06E-01	4,82E-02	1,36E-01
Staub	7,15E+00	3,17E+00	4,53E+00	1,49E+00	1,46E+00	2,16E+00	1,29E-01	6,88E-02	1,11E-01

¹⁾ exclusive Bereitstellung

²⁾ Auf Basis des thermischen Wirkungsgrades von Kernkraftwerken (siehe Abschnitt 4.2.5).

³⁾ Stahlrohrkarosserie

Tabelle E.2: Gesamtbilanz aufgeschlüsselt nach Einzelprozessen der Herstellung und Entsorgung einer Stahlrohkarosserie eines Mittelklasse-Pkw, für das Szenario „Basis“. Angegeben sind Mittelwert $\langle x \rangle$, Standardabweichung des Mittelwertes m , Standardabweichung s sowie bei Teilprozessketten der mittlere Stichprobenumfang $\langle n \rangle$. (Teil 2)

	Kalksteinabbau			Kalk-Kalzineren			Sintern		
	$\langle x \rangle$	m	s	$\langle x \rangle$	m	s	$\langle x \rangle$	m	s
Prozesswichtung	9,35E+01	8,84E+00	1,53E+01	4,54E+01	2,95E+00	6,15E+00	3,13E+02	3,68E+01	9,57E+01
Energieträger	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ
Steinkohle	8,70E-01	5,77E-01	8,13E-01	3,06E+02	8,55E+01	1,13E+02	2,32E+01	7,02E+00	1,25E+01
Braunkohle	1,57E-01	1,58E-01	2,26E-01	2,09E+00	5,01E-01	9,34E-01	7,81E+00	1,23E+00	3,65E+00
Endgas	4,55E-01	3,49E-01	4,96E-01	5,38E+01	4,91E+01	6,97E+01	5,09E+00	7,14E-01	2,19E+00
Öl	7,81E+00	3,95E+00	5,62E+00	8,92E+00	4,20E+00	5,99E+00	9,76E+00	1,35E+00	4,22E+00
E _{prim} aus Uran ¹⁾	7,65E-01	7,69E-01	1,09E+00	1,02E+01	2,28E+00	4,02E+00	3,81E+01	5,04E+00	1,59E+01
Pot. En. Wasser	1,19E-01	1,20E-01	1,70E-01	1,50E+00	3,40E-01	5,97E-01	5,93E+00	8,03E-01	2,48E+00
Gichtgas	-	-	-	-	-	-	3,88E+00	2,87E+00	1,27E+01
Koksgas	-	-	-	-	-	-	4,55E+01	2,28E+01	1,00E+02
Konvertergas	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Materialbedarf	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg
Bauxit ²⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bentonit ²⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Brannkalk	-	-	-	-4,54E+01	2,95E+00	6,15E+00	2,07E+00	1,37E+00	3,37E+00
Eisenerz	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sinter	-	-	-	-	-	-	-3,13E+02	3,68E+01	9,57E+01
Pellets	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Elektrode	-	-	-	-	-	-	-	-	-
H ₂ SO ₄ ²⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kalkstein	1,03E+01	9,73E-01	1,68E+00	8,86E+01	6,18E+00	1,24E+01	-	-	-
Karosserie ³⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Legierungen ²⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Pech ²⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Petrolkoks ²⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Roheisen	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Rohrherz	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Rohstahl	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sauerstoff ²⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Schlacke u.ä. ²⁾	-	-	-	-	-	-	2,71E+01	1,39E+01	1,59E+01
Schrott	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Shredderschrott	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Stahlblech	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Stahlbl. gepr. ³⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Vorbrammen	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Walzöl ¹⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Warmband	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Zuschläge ²⁾	-	-	-	-	-	-	4,69E+01	2,41E+01	2,75E+01
Ausbruch	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Auswurf	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Rohbenzol	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Rohrteer	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Schlacke	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Stäube	-	-	-	-	-	-	3,75E+00	1,33E+00	1,70E+00
Walzzander	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Schlamm ²⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Em. in Luft	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg
C ₂ F ₆	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CF ₄	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CH ₄	9,30E-04	2,50E-04	3,30E-04	8,61E-02	1,64E-02	3,39E-02	5,82E-02	3,63E-02	5,79E-02
CO	2,45E-04	1,15E-04	1,31E-04	2,22E-02	1,14E-02	1,26E-02	2,91E+00	1,46E+00	2,83E+00
CO ₂	7,10E-01	2,04E-01	2,96E-01	5,95E+01	4,54E+00	8,83E+00	5,10E+01	6,49E+00	2,06E+01
HCl	2,73E-05	2,49E-05	3,48E-05	9,79E-03	5,63E-03	6,43E-03	1,40E-02	6,63E-03	1,29E-02
HF	1,95E-06	1,64E-06	2,40E-06	3,73E-04	2,08E-04	2,39E-04	2,38E-03	1,15E-03	2,23E-03
N ₂ O	7,54E-06	3,59E-06	4,17E-06	2,79E-04	1,21E-04	1,29E-04	1,60E-03	7,64E-04	9,95E-04
NH ₃	3,05E-07	2,11E-07	3,10E-07	1,45E-05	6,59E-06	7,79E-06	1,05E-05	2,33E-06	6,51E-06
NM _{VOC}	1,40E-03	9,72E-04	1,19E-03	4,59E-03	2,68E-03	5,12E-03	2,68E-02	6,98E-03	1,37E-02
NO _x	1,11E-03	2,69E-04	4,11E-04	5,18E-02	1,30E-02	2,51E-02	2,07E-01	3,22E-02	1,15E-01
SO ₂	1,62E-03	3,50E-04	6,33E-04	1,16E-01	2,99E-02	4,69E-02	4,35E-01	6,80E-02	1,88E-01
Staub	3,98E+00	2,78E+00	3,96E+00	8,41E-01	4,13E-01	4,25E-01	1,69E-01	3,97E-02	7,41E-02

¹⁾ Von Bereitstellung nur Energiebedarf erfasst.

²⁾ Abbrände, Schlacken, Zunder, Stäube

³⁾ Stahlblech gepreßt

Tabelle E.3: Gesamtbilanz aufgeschlüsselt nach Einzelprozessen der Herstellung und Entsorgung einer Stahlrohrkarosserie eines Mittelklasse-Pkw, für das Szenario „Basis“. Angegeben sind Mittelwert $\langle x \rangle$, Standardabweichung des Mittelwertes m , Standardabweichung s sowie bei Teilprozessketten der mittlere Stichprobenumfang $\langle n \rangle$. (Teil 3)

	Hochofen			Steinkohleförderung			Kokserzeugung		
	$\langle x \rangle$	m	s	$\langle x \rangle$	m	s	$\langle x \rangle$	m	s
Prozeßwirkung	3,48E+02	2,01E+01	4,93E+01	2,25E+02	1,38E+01	4,69E+01	1,64E+02	9,63E+00	3,05E+01
Energieträger	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ
Steinkohle	1,32E+03	2,81E+02	8,59E+02	4,37E+01	2,30E+01	2,61E+01	1,03E+04	1,86E+03	2,58E+03
Braunkohle	2,37E+01	3,82E+00	1,10E+01	-	-	-	5,85E+00	6,08E-01	2,55E+00
Erdgas	7,22E+01	2,18E+01	7,71E+01	-	-	-	2,32E+01	1,39E+01	3,12E+01
Öl	2,33E+02	8,28E+01	3,92E+02	3,98E+02	2,22E+02	2,22E+02	7,51E+00	4,90E-01	2,95E+00
$E_{\text{H}_2\text{O}}$ aus Uran ¹⁾	1,15E+02	1,58E+01	4,81E+01	-	-	-	2,86E+01	1,68E+00	1,09E+01
Pot. En. Wasser	1,80E+01	2,51E+00	7,50E+00	-	-	-	4,44E+00	2,92E-01	1,71E+00
Gichtgas	-1,57E+03	1,02E+02	4,09E+02	-	-	-	1,86E+02	9,98E+01	1,75E+02
Koksgas	3,25E+02	1,17E+02	4,19E+02	-	-	-	3,94E+02	8,99E+01	1,67E+02
Konvertergas	-	-	-	-	-	-	-1,33E+03	8,34E+01	2,52E+02
Materialbedarf	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg
Bauxit ¹⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bentonit ¹⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Brannkalk	1,04E+01	5,25E+00	5,42E+00	-	-	-	-	-	-
Eisenerz (8)	4,80E+02	2,84E+01	6,98E+01	-	-	-	-	-	-
Sinter	3,13E+02	3,68E+01	9,57E+01	-	-	-	-	-	-
Pellets	1,53E+02	4,20E+01	1,11E+02	-	-	-	-	-	-
Elektrode	-	-	-	-	-	-	-	-	-
H ₂ SO ₄ ¹⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kalkstein (8)	4,77E+01	2,87E+00	6,85E+00	-	-	-	-	-	-
Karosserie ²⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Legierungen ²⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Pech ²⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Petrolkoks ²⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Roheisen	-3,48E+02	2,01E+01	4,93E+01	-	-	-	-	-	-
Roherz	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Rohstahl	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sauerstoff ¹⁾	5,70E+00	5,71E+00	5,76E+00	-	-	-	-	-	-
Schlacke u.ä. ⁴⁾	9,39E+00	2,49E+00	3,69E+00	-	-	-	-	-	-
Schrott	1,16E+00	3,31E-01	4,87E-01	-	-	-	-	-	-
Shredderschrott	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Stahlblech	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Stahlbl. gepr. ⁵⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Vorbrammen	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Walzöl ¹⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Warmband	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Zuschläge ²⁾	7,22E+00	1,81E+00	3,68E+00	-	-	-	-	-	-
Ausbruch	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Auswurf	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Rohbenzol	-	-	-	-	-	-	-1,83E+00	2,94E-01	6,98E-01
Rohleer	-	-	-	-	-	-	-7,62E+00	6,96E-01	1,85E+00
Schlacke	-1,07E+02	1,06E+01	3,52E+01	-	-	-	-	-	-
Stäube	-4,29E+00	6,76E-01	1,55E+00	-	-	-	-	-	-
Walzzunder	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Schlamm ⁶⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Em. in Luft	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg
C ₂ F ₆	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CF ₄	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CH ₄	2,05E-02	8,39E-03	2,82E-02	2,59E+00	1,28E+00	1,38E+00	1,82E-02	6,33E-03	2,27E-02
CO	7,80E-02	4,80E-02	1,36E-01	2,38E-02	1,17E-02	1,33E-02	1,55E-01	4,69E-02	1,25E-01
CO ₂	4,97E+02	4,43E+01	7,07E+01	2,91E+01	2,91E+00	6,89E+00	1,16E+02	8,21E+00	2,47E+01
HCl	2,78E-03	8,34E-04	2,43E-03	1,08E-02	5,25E-03	5,86E-03	3,21E-04	1,18E-04	1,97E-04
HF	2,35E-04	5,28E-05	1,54E-04	4,54E-04	1,88E-04	2,15E-04	1,98E-04	7,74E-05	8,81E-05
N ₂ O	6,22E-04	1,19E-04	2,92E-04	3,51E-04	1,25E-04	1,47E-04	1,93E-05	7,84E-06	1,39E-05
NH ₃	3,93E-05	6,57E-06	1,79E-05	2,72E-05	1,05E-05	1,57E-05	1,89E-02	1,14E-02	4,39E-02
NM VOC	9,60E-03	3,21E-03	5,54E-03	1,64E-02	5,71E-03	7,15E-03	5,84E-02	2,66E-02	2,85E-02
NO _x	1,35E-01	2,81E-02	7,83E-02	6,63E-02	9,23E-03	2,50E-02	1,24E-01	1,45E-02	5,89E-02
SO ₂	1,47E-01	3,29E-02	1,10E-01	1,59E-01	1,62E-02	4,45E-02	1,03E-01	1,64E-02	6,89E-02
Staub	5,14E-02	2,01E-02	7,72E-02	6,35E-02	2,27E-02	2,61E-02	4,52E-02	9,17E-03	4,19E-02

¹⁾ Walzzunderschlamm

²⁾ Im Hochofenprozeß miterfaßt

(8) Einträge über Pellets und Sinter miterfaßt; um Kovarianzen zu berücksichtigen.

Tabelle E.4: Gesamtbilanz aufgeschlüsselt nach Einzelprozessen der Herstellung und Entsorgung einer Stahlrohkarosserie eines Mittelklasse-Pkw, für das Szenario „Basis“. Angegeben sind Mittelwert $\langle x \rangle$, Standardabweichung des Mittelwertes m , Standardabweichung s sowie bei Teilprozessen der mittlere Stichprobenumfang $\langle n \rangle$. (Teil 4)

	Oxygenstahlerzeugung			Strangguß ⁹⁾			Warmwalzen ⁹⁾		
	$\langle x \rangle$	m	s	$\langle x \rangle$	m	s	$\langle x \rangle$	m	s
Prozeßwichtung	4,03E+02	1,97E+01	4,70E+01	5,01E+02	1,89E+01	4,52E+01	4,77E+02	1,60E+01	3,96E+01
Energieträger	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ
Steinkohle	3,67E+01	9,79E+00	1,38E+01	1,04E+02	3,51E+01	3,77E+01	3,78E+02	2,06E+02	2,88E+02
Braunkohle	1,13E+01	1,29E+00	3,22E+00	8,10E+00	2,00E+00	4,14E+00	3,65E+01	3,67E+00	8,75E+00
Erdgas	6,71E+01	2,98E+01	5,19E+01	5,28E+00	1,25E+00	2,53E+00	2,43E+02	2,08E+02	2,95E+02
Öl	2,00E+01	4,81E+00	8,69E+00	1,04E+01	2,43E+00	4,93E+00	2,42E+02	1,69E+02	2,39E+02
En _{min} aus Uran ¹⁾	5,46E+01	4,14E+00	1,05E+01	3,96E+01	9,16E+00	1,84E+01	1,78E+02	9,31E+00	2,05E+01
Pot. En. Wasser	8,49E+00	6,90E-01	1,66E+00	6,15E+00	1,44E+00	2,87E+00	2,77E+01	1,66E+00	3,29E+00
Gichtgas	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Koksgas	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Konvertergas	-2,78E+02	6,40E+01	1,44E+02	-	-	-	-	-	-
Materialbedarf	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg
Bauxit ²⁾	4,25E+00	2,14E+00	2,18E+00	-	-	-	-	-	-
Bentonit ²⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Brannkalk	2,75E+01	2,95E+00	6,15E+00	-	-	-	-	-	-
Eisenerz	8,79E+00	7,61E+00	1,32E+01	-	-	-	-	-	-
Sinter	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Pellets	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Elektrode	-	-	-	-	-	-	-	-	-
H ₂ SO ₄ ²⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kalkstein	2,01E+00	1,01E+00	1,03E+00	-	-	-	-	-	-
Karosserie ²⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Legierungen ²⁾	2,01E+00	1,01E+00	1,03E+00	-	-	-	-	-	-
Pech ²⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Petrolkoks ²⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Roheisen	3,48E+02	2,00E+01	4,89E+01	-	-	-	-	-	-
Roherz	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Rohstahl	-4,03E+02	1,97E+01	4,70E+01	5,19E+02	1,97E+01	4,70E+01	-	-	-
Sauerstoff ²⁾	3,39E+01	4,69E+00	1,06E+01	-	-	-	-	-	-
Schlacke u.ä. ²⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Schrott	9,32E+01	8,18E+00	2,02E+01	-1,80E+01	1,91E+00	3,92E+00	-1,46E+01	4,09E+00	7,87E+00
Shredderschrott	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Stahlblech	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Stahlbl. gepr. ²⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Vorbrammen	-	-	-	-5,01E+02	1,89E+01	4,52E+01	5,01E+02	1,89E+01	4,52E+01
Walzöl ²⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Warmband	-	-	-	-	-	-	-4,77E+02	1,60E+01	3,96E+01
Zuschläge ²⁾	8,15E+00	6,67E+00	1,16E+01	-	-	-	-	-	-
Ausbruch	-6,45E+00	1,25E+00	1,42E+00	-	-	-	-	-	-
Auswurf	-5,80E+00	2,91E+00	2,98E+00	-	-	-	-	-	-
Rohbenzol	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Rohteer	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Schlacke	-4,80E+01	4,67E+00	1,14E+01	-	-	-	-	-	-
Stäube	-1,28E+01	5,19E+00	9,02E+00	-	-	-	-	-	-
Walzzunder	-	-	-	-	-	-	-1,01E+01	5,27E+00	1,14E+01
Schlamm ²⁾	-	-	-	-	-	-	-4,99E+00	1,48E+00	2,08E+00
Em. in Luft	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg
C ₂ F ₆	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CF ₄	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CH ₄	2,71E-02	1,11E-02	1,97E-02	2,51E-02	1,20E-02	1,42E-02	1,38E-01	5,42E-02	8,13E-02
CO	4,54E+00	2,44E-01	5,48E-01	6,74E-03	4,47E-03	4,51E-03	3,26E-02	2,15E-02	2,87E-02
CO ₂	3,16E+01	6,01E+00	1,24E+01	8,67E+00	2,97E+00	3,36E+00	6,30E+01	1,99E+01	2,85E+01
HCl	1,57E-03	7,73E-04	1,29E-03	3,43E-03	2,09E-03	2,13E-03	1,02E-02	1,38E-02	1,38E-02
HF	1,15E-04	3,35E-05	7,08E-05	1,59E-04	7,89E-05	8,82E-05	6,27E-04	3,72E-04	5,27E-04
N ₂ O	1,30E-04	5,37E-05	8,72E-05	9,88E-05	5,06E-05	5,45E-05	8,58E-04	4,67E-04	6,54E-04
NH ₃	1,70E-05	3,53E-06	8,09E-06	1,25E-05	3,70E-06	6,74E-06	6,74E-05	1,65E-05	3,05E-05
NM VOC	7,37E-02	3,47E-02	3,62E-02	2,45E-03	1,04E-03	1,28E-03	4,94E-02	4,20E-02	5,83E-02
NO _x	5,13E-02	1,74E-02	2,01E-02	2,00E-02	7,59E-03	9,94E-03	1,27E-01	7,21E-02	1,04E-01
SO ₂	4,50E-02	1,72E-02	3,22E-02	4,75E-02	1,73E-02	2,15E-02	4,07E-01	3,12E-01	4,59E-01
Staub	6,84E-02	2,32E-02	4,05E-02	9,38E-03	4,60E-03	5,03E-03	5,63E-02	3,47E-02	4,81E-02

⁹⁾ Über Teilprozesse "Blechherstellung" miteinfaßt.

Tabelle E.5: Gesamtbilanz aufgeschlüsselt nach Einzelprozessen der Herstellung und Entsorgung einer Stahlrohkarosserie eines Mittelklasse-Pkw, für das Szenario „Basis“. Angegeben sind Mittelwert $\langle x \rangle$, Standardabweichung des Mittelwertes m , Standardabweichung s sowie bei Teilprozessketten der mittlere Stichprobenumfang $\langle n \rangle$. (Teil 5)

	Kaltwalzen ⁵⁾			Pressen, Stanzen			Fügen einer Stahlkarosserie		
	$\langle x \rangle$	m	s	$\langle x \rangle$	m	s	$\langle x \rangle$	m	s
Prozessleistung	4,33E+02	1,06E+01	2,75E+01	3,10E+02	0,00E+00	0,00E+00	3,10E+02	0,00E+00	0,00E+00
Energieträger	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ
Steinkohle	1,89E+02	5,66E+01	7,81E+01	2,18E+02	8,34E+01	1,38E+02	3,08E+02	8,36E+01	1,04E+02
Braunkohle	6,37E+01	9,63E+00	2,00E+01	7,33E+01	2,07E+01	4,19E+01	1,03E+02	8,88E+00	2,17E+01
Erdgas	5,61E+02	1,11E+02	1,90E+02	4,78E+01	1,31E+01	2,59E+01	6,74E+01	3,20E+00	7,44E+00
Öl	2,03E+02	1,12E+02	1,94E+02	9,41E+01	2,55E+01	5,07E+01	1,33E+02	3,80E+00	1,19E+01
E_{Frem} aus Uran ¹⁾	3,11E+02	3,87E+01	7,28E+01	3,58E+02	9,64E+01	1,90E+02	5,05E+02	2,01E+00	2,67E+00
Pot. En. Wasser	4,84E+01	6,18E+00	1,14E+01	5,57E+01	1,51E+01	2,96E+01	7,86E+01	2,31E+00	2,33E+00
Gichtgas	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Koksgas	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Konvertergas	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Materialbedarf	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg
Bauxit ²⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bentonit ²⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Braunkalk	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Eisenerz	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-	-	-	-	-	-
Sinter	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Pellets	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Elektrode	-	-	-	-	-	-	-	-	-
H ₂ SO ₄ ³⁾	1,44E+01	7,93E+00	1,36E+01	-	-	-	-	-	-
Kalkstein	1,12E+01	5,63E+00	5,67E+00	-	-	-	-	-	-
Karosserie ⁴⁾	-	-	-	-	-	-	-3,10E+02	0,00E+00	0,00E+00
Legierungen ⁴⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Pech ³⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Petrolkoks ³⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Roheisen	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Rohrnetz	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Rohstahl	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sauerstoff ⁴⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Schlacke u.ä. ⁴⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Schrott	-4,42E+01	1,10E+01	2,56E+01	-1,23E+02	1,06E+01	2,75E+01	-	-	-
Shredderschrott	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Stahlblech	-4,33E+02	1,06E+01	2,75E+01	4,33E+02	1,06E+01	2,75E+01	-	-	-
Stahlbl. gepr. ⁵⁾	-	-	-	-3,10E+02	0,00E+00	0,00E+00	3,10E+02	0,00E+00	0,00E+00
Vorbrammen	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Walzöl ³⁾	5,97E-01	1,91E-01	3,32E-01	-	-	-	-	-	-
Warmband	4,77E+02	1,60E+01	3,96E+01	-	-	-	-	-	-
Zuschläge ³⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ausbruch	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Auswurf	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Rohbenzol	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Rohteer	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Schlacke	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Stäube	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Walzzunder	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Schlamm ⁶⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Em. in Luft	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg
C2F6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CF4	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CH4	1,82E-01	5,62E-02	7,64E-02	1,99E-02	7,09E-03	1,23E-02	2,81E-02	6,55E-03	8,87E-03
CO	3,46E-02	1,57E-02	2,84E-02	4,84E-03	1,56E-03	2,80E-03	6,83E-03	1,21E-03	1,57E-03
CO2	7,56E+01	1,05E+01	1,82E+01	3,31E+01	8,95E+00	1,77E+01	4,67E+01	1,03E+00	2,66E+00
HCl	1,70E-02	9,07E-03	1,29E-02	5,32E-03	1,58E-03	3,33E-03	7,50E-03	9,35E-04	2,47E-03
HF	9,14E-04	3,52E-04	5,57E-04	5,64E-04	1,99E-04	4,72E-04	7,96E-04	1,82E-04	5,09E-04
N2O	9,76E-04	2,76E-04	4,27E-04	3,20E-04	1,09E-04	2,35E-04	4,52E-04	9,49E-05	2,26E-04
NH3	9,83E-05	2,04E-05	4,36E-05	1,02E-04	3,29E-05	7,18E-05	1,44E-04	2,54E-05	6,55E-05
NM VOC	5,39E-02	4,01E-02	5,68E-02	1,89E-02	1,01E-02	1,34E-02	2,67E-02	1,23E-02	1,24E-02
NOx	1,54E-01	4,34E-02	6,55E-02	6,47E-02	1,84E-02	3,81E-02	9,13E-02	8,38E-03	2,31E-02
SO2	4,23E-01	1,68E-01	3,04E-01	1,68E-01	5,94E-02	1,35E-01	2,37E-01	5,43E-02	1,40E-01
Staub	6,47E-02	2,04E-02	3,18E-02	3,36E-02	1,06E-02	2,36E-02	4,74E-02	7,73E-03	2,14E-02

Tabelle E.6: Gesamtbilanz aufgeschlüsselt nach Einzelprozessen der Herstellung und Entsorgung einer Stahlrohrkarosserie eines Mittelklasse-Pkw, für das Szenario „Basis“. Angegeben sind Mittelwert $\langle x \rangle$, Standardabweichung des Mittelwertes m , Standardabweichung s sowie bei Teilprozessketten der mittlere Stichprobenumfang $\langle n \rangle$. (Teil 6)

	TPK Blechherstellung ⁽¹⁰⁾				Shredder		
	$\langle x \rangle$	m	s	$\langle n \rangle$	$\langle x \rangle$	m	s
Prozessleistung	4,33E+02	1,06E+01	2,75E+01	0,00E+00	2,79E+02	1,40E+02	1,40E+02
Energieträger	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ
Steinkohle	4,04E+02	2,24E+02	3,27E+02	6,82E+00	5,66E+01	4,89E+01	6,22E+01
Braunkohle	9,05E+01	1,78E+01	2,87E+01	8,00E+00	1,90E+01	1,57E+01	2,03E+01
Endgas	8,34E+02	1,54E+02	3,64E+02	5,77E+00	1,24E+01	1,02E+01	1,30E+01
Öl	2,73E+02	1,56E+02	2,76E+02	6,69E+00	2,81E+01	2,13E+01	2,66E+01
Erzeugnis aus Uran ⁽³⁾	4,42E+02	8,71E+01	1,15E+02	8,00E+00	9,29E+01	7,62E+01	9,72E+01
Pot. En. Wasser	6,87E+01	1,36E+01	1,79E+01	8,00E+00	1,44E+01	1,19E+01	1,51E+01
Gichtgas	7,35E+01	7,36E+01	1,04E+02	2,00E+00	-	-	-
Koks gas	2,37E+02	2,37E+02	3,35E+02	2,00E+00	-	-	-
Konvertiergas	-	-	-	0,00E+00	-	-	-
Materialbedarf	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg
Bauxit ⁽¹⁾	-	-	-	0,00E+00	-	-	-
Bentonit ⁽²⁾	-	-	-	0,00E+00	-	-	-
Brannkalk	-	-	-	0,00E+00	-	-	-
Eisenerz	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-	-	-
Sinter	-	-	-	0,00E+00	-	-	-
Pellets	-	-	-	0,00E+00	-	-	-
Elektrode	-	-	-	0,00E+00	-	-	-
H ₂ SO ₄ ⁽⁹⁾	1,44E+01	7,93E+00	1,36E+01	3,00E+00	-	-	-
Kalkstein	1,12E+01	5,63E+00	5,67E+00	1,00E+00	-	-	-
Karosserie ⁽³⁾	-	-	-	0,00E+00	3,10E+02	2,19E+02	2,19E+02
Legierungen ⁽¹⁾	-	-	-	0,00E+00	-	-	-
Pech ⁽¹⁾	-	-	-	0,00E+00	-	-	-
Petrolkoks ⁽³⁾	-	-	-	0,00E+00	-	-	-
Roheisen	-	-	-	0,00E+00	-	-	-
Roherz	-	-	-	-	-	-	-
Rohstahl	5,01E+02	2,11E+01	4,95E+01	7,00E+00	-	-	-
Sauerstoff ⁽⁹⁾	-	-	-	0,00E+00	-	-	-
Schlacke u.ä. ⁽⁹⁾	-	-	-	0,00E+00	-	-	-
Schrott	-5,26E+01	2,80E+01	4,90E+01	9,34E+00	-	-	-
Shredderschrott	-	-	-	0,00E+00	-2,79E+02	1,40E+02	1,40E+02
Stahlblech	-4,33E+02	0,00E+00	2,75E+01	2,00E+00	-	-	-
Stahlbl. gepr. ⁽³⁾	-	-	-	0,00E+00	-	-	-
Vorbrannen	0,00E+00	2,68E+01	6,39E+01	3,00E+00	-	-	-
Walzöl ⁽⁹⁾	5,97E-01	1,91E-01	3,32E-01	3,00E+00	-	-	-
Warmband	0,00E+00	2,27E+01	5,60E+01	3,50E+00	-	-	-
Zuschläge ⁽⁹⁾	-	-	-	0,00E+00	-	-	-
Ausbruch	-	-	-	0,00E+00	-	-	-
Auswurf	-	-	-	0,00E+00	-	-	-
Rohbenzol	-	-	-	0,00E+00	-	-	-
Rohteer	-	-	-	0,00E+00	-	-	-
Schlacke	-	-	-	0,00E+00	-	-	-
Stäube	-	-	-	0,00E+00	-	-	-
Walzzunder	-1,12E+01	3,92E+00	1,08E+01	7,00E+00	-	-	-
Schlamm ⁽⁹⁾	-4,08E+00	1,12E+00	2,27E+00	5,00E+00	-	-	-
Em. in Luft	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg
C ₂ F ₆	-	-	-	0,00E+00	-	-	-
CF ₄	-	-	-	0,00E+00	-	-	-
CH ₄	2,69E-01	8,08E-02	9,61E-02	4,73E+00	5,54E-03	4,52E-03	5,73E-03
CO	5,91E-02	1,65E-02	2,57E-02	4,99E+00	1,36E-03	1,09E-03	1,37E-03
CO ₂	1,33E+02	1,69E+01	4,22E+01	5,32E+00	8,88E+00	7,14E+00	9,08E+00
HCl	2,09E-02	1,08E-02	1,22E-02	5,57E+00	1,39E-03	1,15E-03	1,51E-03
HF	1,20E-03	4,54E-04	8,12E-04	6,21E+00	1,46E-04	1,25E-04	1,79E-04
N ₂ O	1,53E-03	4,08E-04	8,28E-04	5,20E+00	8,93E-05	7,23E-05	9,79E-05
NH ₃	1,45E-04	3,04E-05	6,40E-05	6,81E+00	2,66E-05	2,22E-05	3,02E-05
NM VOC	6,65E-02	3,48E-02	8,92E-02	5,45E+00	5,57E-03	4,83E-03	5,79E-03
NO _x	2,38E-01	6,25E-02	1,25E-01	5,40E+00	1,75E-02	1,41E-02	1,82E-02
SO ₂	5,71E-01	2,83E-01	5,24E-01	5,71E+00	4,76E-02	3,84E-02	5,34E-02
Staub	9,35E-02	3,51E-02	6,01E-02	5,90E+00	9,67E-03	7,59E-03	1,02E-02

⁽¹⁰⁾ Einzelprozesse "Strangguß", "Warmwalzen" und "Kaltwalzen" bereits eingefaltet.

Tabelle E.7: Gesamtbilanz aufgeschlüsselt nach Einzelprozessen der Herstellung und Entsorgung einer Stahlrohrkarosserie eines Mittelklasse-Pkw, für das Szenario „Basis“. Angegeben sind Mittelwert $\langle x \rangle$, Standardabweichung des Mittelwertes m , Standardabweichung s sowie bei Teilprozessketten der mittlere Stichprobenumfang $\langle n \rangle$. (Teil 7)

	Elektrostahlerzeugung			Elektrodenherstellung			Transport ¹⁾		
	$\langle x \rangle$	m	s	$\langle x \rangle$	m	s	$\langle x \rangle$	m	s
Prozesswichtung	9,81E+01	1,06E+01	2,75E+01	2,65E-01	4,11E-02	8,51E-02			
Energieträger	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ
Steinkohle	5,63E+02	1,02E+02	1,82E+02	6,93E-01	2,63E-01	3,28E-01	3,28E+01	2,22E+01	2,34E+01
Braunkohle	5,01E+01	8,41E+00	2,05E+01	4,31E-02	2,29E-02	2,72E-02	1,10E+01	6,89E+00	7,28E+00
Erdgas	3,27E+01	4,96E+00	1,20E+01	1,15E+00	5,55E-01	6,46E-01	7,18E+00	4,46E+00	4,57E+00
Öl	9,11E+01	1,35E+01	2,80E+01	5,54E-02	2,90E-02	3,33E-02	1,40E+03	3,85E+02	3,93E+02
E _{prim} aus Uran ¹⁾	2,45E+02	3,53E+01	8,62E+01	2,11E-01	1,10E-01	1,25E-01	5,38E+01	3,33E+01	3,37E+01
Pot. En. Wasser	3,81E+01	5,60E+00	1,34E+01	3,28E-02	1,72E-02	1,95E-02	8,36E+00	5,19E+00	5,25E+00
Gichtgas	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Koksgas	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Konvertergas	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Materialbedarf	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg
Bauxit ²⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bentonit ²⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Brannkalk	2,94E+00	1,51E+00	1,69E+00	-	-	-	-	-	-
Eisenerz	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sinter	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Pellets	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Elektrode	2,65E-01	4,11E-02	8,51E-02	-2,65E-01	4,11E-02	8,51E-02	-	-	-
H ₂ SO ₄ ²⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kalkstein	1,67E-01	8,54E-02	9,57E-02	-	-	-	-	-	-
Karosserie ²⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Legierungen ²⁾	1,16E+00	5,92E-01	6,64E-01	-	-	-	-	-	-
Pech ²⁾	-	-	-	5,30E-02	2,77E-02	3,15E-02	-	-	-
Petrolkoks ²⁾	-	-	-	2,12E-01	1,11E-01	1,26E-01	-	-	-
Roheisen	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Roherz	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Rohstahl	-9,81E+01	1,06E+01	2,75E+01	-	-	-	-	-	-
Sauerstoff ²⁾	1,26E+01	4,78E+00	8,66E+00	-	-	-	-	-	-
Schlacke u.ä. ²⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Schrott	1,07E+02	1,17E+01	3,02E+01	-	-	-	-	-	-
Shredderschrott	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Stahlblech	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Stahlbl. gepr. ²⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Vorbrammen	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Walzöl ²⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Warmband	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Zuschläge ²⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ausbruch	-2,32E+00	1,18E+00	1,33E+00	-	-	-	-	-	-
Auswurf	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Rohbenzol	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Rohteer	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Schlacke	-5,21E+00	9,69E-01	2,15E+00	-	-	-	-	-	-
Stäube	-2,25E+00	8,08E-01	1,48E+00	-	-	-	-	-	-
Walzzunder	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Schlamm ²⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Em. in Luft	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg
C2F6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CF4	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CH4	1,34E-01	1,98E-02	5,24E-02	2,72E-04	1,49E-04	2,08E-04	1,46E-02	5,43E-03	5,55E-03
CO	5,13E-01	3,34E-01	5,85E-01	4,23E-05	2,80E-05	3,05E-05	1,09E-01	4,59E-02	4,66E-02
CO2	5,21E+01	6,24E+00	1,56E+01	1,17E-01	5,00E-02	5,99E-02	1,01E+02	3,54E+01	3,61E+01
HCl	1,71E-02	7,03E-03	8,41E-03	4,82E-06	2,16E-06	2,85E-06	7,98E-04	5,05E-04	5,65E-04
HF	8,82E-04	2,83E-04	4,36E-04	5,11E-07	2,45E-07	3,89E-07	8,48E-05	5,60E-05	7,59E-05
N2O	5,72E-04	1,80E-04	2,58E-04	1,22E-06	7,22E-07	8,08E-07	2,82E-04	1,11E-04	1,16E-04
NH3	8,54E-05	1,84E-05	4,31E-05	9,47E-08	4,30E-08	6,09E-08	1,53E-05	9,89E-06	1,19E-05
NM VOC	2,48E-02	7,57E-03	1,02E-02	8,64E-05	5,31E-05	5,84E-05	5,69E-02	2,12E-02	2,15E-02
NOx	1,25E-01	1,81E-02	4,69E-02	1,32E-04	5,70E-05	6,91E-05	7,27E-01	3,29E-01	3,34E-01
SO2	2,84E-01	4,39E-02	1,12E-01	4,57E-04	2,15E-04	2,61E-04	1,20E+00	4,40E-01	4,56E-01
Staub	7,23E-02	1,81E-02	2,92E-02	5,19E-05	2,31E-05	2,96E-05	6,12E-02	1,91E-02	1,97E-02

¹⁾ Wichtung über Produkt aus Transportentfernung (siehe Abschnitt 4.2.6) und gewichteter Bedarf im Zielprozeß.

Aluminiumrohkarosserie im Szenario „Basis“

Tabelle E.8: Gesamtbilanz aufgeschlüsselt nach Einzelprozessen der Herstellung und Entsorgung einer Aluminiumrohkarosserie eines Mittelklasse-Pkw, für das Szenario „Basis“. Angegeben sind Mittelwert $\langle x \rangle$, Standardabweichung des Mittelwertes m , Standardabweichung s sowie bei Teilprozessketten der mittlere Stichprobenumfang $\langle n \rangle$. (Teil 1)

Prozesskategorie				Bauxitabbau ¹⁾			Bayer-Prozess ¹⁾		
	$\langle x \rangle$	m	s	$\langle x \rangle$	m	s	$\langle x \rangle$	m	s
Prozessgewicht	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ
Energieträger									
Steinkohle	1,59E+04	3,63E+03	5,47E+03	5,25E+00	3,09E+00	3,58E+00	9,74E+02	4,33E+02	8,28E+02
Braunkohle	2,08E+03	2,37E+02	5,28E+02	-	-	-	1,81E+02	5,48E+01	1,13E+02
Erdgas	6,88E+03	8,34E+02	1,34E+03	-	-	-	1,07E+03	4,11E+02	8,27E+02
Öl	1,22E+04	2,73E+03	1,99E+03	7,04E+02	3,13E+02	3,55E+02	4,20E+03	8,73E+02	1,67E+03
Einheit aus Uran ¹⁾	9,99E+03	1,01E+03	2,17E+03	-	-	-	8,84E+02	2,56E+02	5,17E+02
Pot. En. Wasser	8,78E+03	1,23E+03	2,63E+03	-	-	-	1,37E+02	4,01E+01	8,06E+01
Materialbedarf	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg
Abbrand	-1,19E+01	4,25E+00	9,41E+00	-	-	-	-	-	-
AlF ₃	0,00E+00	2,06E+00	4,16E+00	-	-	-	-	-	-
Alu. primär	0,00E+00	3,12E+01	9,35E+01	-	-	-	-	-	-
Alu. sekundär	0,00E+00	5,59E+01	1,23E+02	-	-	-	-	-	-
Al. Walzbarren	0,00E+00	4,57E+01	7,92E+01	-	-	-	-	-	-
Walzb. hom. ²⁾	0,00E+00	4,57E+01	7,92E+01	-	-	-	-	-	-
Alu.-Blech	0,00E+00	4,93E+00	9,08E+00	-	-	-	-	-	-
Blech gepreßt	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-	-	-	-	-	-
Anode ³⁾	0,00E+00	2,19E+01	4,90E+01	-	-	-	-	-	-
Bauxit	0,00E+00	1,97E+02	2,95E+02	-9,21E+02	1,39E+02	2,92E+02	9,13E+02	1,39E+02	2,92E+02
Brantkalk	0,00E+00	6,13E+00	1,19E+01	-	-	-	2,29E+01	4,33E+00	8,44E+00
H ₂ SiF ₆ ⁴⁾	4,18E+00	2,40E+00	3,17E+00	-	-	-	-	-	-
Kalkstein	5,02E+01	8,58E+00	1,66E+01	-	-	-	-	-	-
Kaltband Al.	0,00E+00	4,04E+01	7,00E+01	-	-	-	-	-	-
Kar. Alu. ⁵⁾	0,00E+00	1,42E+02	1,72E+02	-	-	-	-	-	-
Kar. ungeh. ⁵⁾	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-	-	-	-	-	-
Kieselsäure	-2,79E+00	1,60E+00	2,11E+00	-	-	-	-	-	-
Kraetz ⁶⁾	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-	-	-	-	-	-
Legierungen ⁷⁾	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-	-	-	-	-	-
NaOH	0,00E+00	1,96E+01	4,51E+01	-	-	-	5,88E+01	1,39E+01	3,19E+01
Pech ⁸⁾	2,36E+01	5,22E+00	1,10E+01	-	-	-	-	-	-
Petrolkoks ⁹⁾	7,92E+01	1,27E+01	2,81E+01	-	-	-	-	-	-
Roßförderung	1,80E+03	8,00E+02	2,36E+03	1,80E+03	8,00E+02	2,36E+03	-	-	-
Sand ¹⁰⁾	5,95E-03	3,28E-03	4,36E-03	-	-	-	-	-	-
Schmelzsatz ¹¹⁾	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-	-	-	-	-	-
Schrott neu	0,00E+00	4,05E+01	7,02E+01	-	-	-	-	-	-
Shredderschrott	-1,71E+02	8,56E+01	1,06E+02	-	-	-	-	-	-
Steinsalz	1,73E+01	4,05E+00	9,29E+00	-	-	-	-	-	-
Tonerde	0,00E+00	6,34E+01	1,85E+02	-	-	-	-4,24E+02	6,34E+01	1,31E+02
Walzöl ¹²⁾	1,39E+00	1,10E-01	1,80E-01	-	-	-	-	-	-
Warmband Al.	0,00E+00	4,04E+01	7,00E+01	-	-	-	-	-	-
Ausbruch	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-	-	-	-	-	-
Cl ₂	-2,67E+01	6,24E+00	1,43E+01	-	-	-	-	-	-
H ₂	-7,55E-01	1,76E-01	4,05E-01	-	-	-	-	-	-
Stäube	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-	-	-	-	-	-
Em. in Luft	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg
C ₂ F ₆	3,66E-02	8,27E-03	1,63E-02	-	-	-	-	-	-
CF ₄	1,46E-01	5,21E-02	1,35E-01	-	-	-	-	-	-
CH ₄	2,55E+00	2,78E-01	6,14E-01	4,31E-02	2,30E-02	2,66E-02	8,98E-01	2,30E-01	4,93E-01
CO	2,09E+01	5,78E+00	1,55E+01	1,19E-02	6,39E-03	7,40E-03	2,09E-01	8,35E-02	1,40E-01
CO ₂	2,85E+03	2,50E+02	5,20E+02	5,50E+01	2,83E+01	3,22E+01	4,30E+02	7,75E+01	1,64E+02
HCl	3,62E-01	5,33E-02	1,25E-01	9,43E-04	4,42E-04	5,28E-04	5,49E-02	3,41E-02	6,37E-02
HF	2,78E-01	1,19E-01	2,04E-02	2,77E-05	1,12E-05	1,66E-05	2,55E-03	1,26E-03	2,37E-03
N ₂ O	2,82E-02	3,93E-03	6,59E-03	7,32E-04	3,91E-04	4,53E-04	6,82E-03	2,71E-03	4,52E-03
NH ₃	5,73E-03	1,09E-03	2,82E-03	9,71E-06	4,11E-06	5,16E-06	2,65E-04	7,89E-05	1,65E-04
NM ₂ VO	1,80E+00	3,48E-01	6,06E-01	7,55E-02	4,05E-02	4,69E-02	4,95E-01	2,94E-01	4,62E-01
NO _x	5,67E+00	7,71E-01	1,42E+00	1,40E-01	7,38E-02	5,32E-02	8,88E-01	2,37E-01	5,17E-01
SO ₂	1,59E+01	2,04E+00	4,96E+00	4,59E-01	2,46E-01	2,85E-01	3,43E+00	1,27E+00	2,95E+00
Staub	6,12E+00	1,19E+00	2,43E+00	3,56E-02	1,88E-02	2,18E-02	3,74E-01	1,50E-01	2,47E-01

¹⁾ exclusive Bereitstellung

²⁾ Auf Basis des thermischen Wirkungsgrades von Kernkraftwerken (siehe Abschnitt 4.2.5).

Tabelle E.9: Gesamtbilanz aufgeschlüsselt nach Einzelprozessen der Herstellung und Entsorgung einer Aluminiumrohkarosserie eines Mittelklasse-Pkw, für das Szenario „Basis“. Angegeben sind Mittelwert $\langle x \rangle$, Standardabweichung des Mittelwertes m , Standardabweichung s sowie bei Teilprozessketten der mittlere Stichprobenumfang $\langle n \rangle$. (Teil 2)

	Natronlauge (mit Steinsalzabbau) ¹⁾			Kalksteinabbau ²⁾			Kalk-Kalzinieren ³⁾		
	$\langle x \rangle$	m	s	$\langle x \rangle$	m	s	$\langle x \rangle$	m	s
Prozeßwichtung	5,95E+01	1,39E+01	3,19E+01	4,50E+01	8,53E+00	1,65E+01	2,31E+01	4,34E+00	8,44E+00
Energieträger	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ
Steinkohle	1,44E+02	5,28E+01	9,39E+01	4,18E-01	2,86E-01	4,14E-01	1,55E+02	5,05E+01	7,60E+01
Braunkohle	3,95E+01	1,11E+01	2,39E+01	7,54E-02	7,70E-02	1,11E-01	1,06E+00	3,10E-01	5,84E-01
Erdgas	8,42E+01	5,84E+01	9,01E+01	2,19E-01	1,72E-01	2,49E-01	2,73E+01	2,53E+01	3,65E+01
Öl	2,19E+02	1,20E+02	1,92E+02	3,76E+00	1,99E+00	2,95E+00	4,53E+00	2,20E+00	3,21E+00
E _{prim} aus Uran ¹⁾	1,93E+02	5,18E+01	1,09E+02	3,68E-01	3,75E-01	5,38E-01	5,19E+00	1,45E+00	2,64E+00
Pot. En. Wasser	3,00E+01	8,10E+00	1,70E+01	5,72E-02	5,83E-02	8,37E-02	7,63E-01	2,19E-01	3,99E-01
Materialbedarf	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg
Abbrand	-	-	-	-	-	-	-	-	-
AlF ₃	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alu. primär	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alu. sekundär	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Al. Walzbarren	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Walzb. hom. ²⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alu.-Blech	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Blech gepreßt	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Anode ³⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bauxit	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Brantkalk	-	-	-	-	-	-	-2,31E+01	4,34E+00	8,44E+00
H ₂ SiF ₆ ⁴⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kalkstein	3,12E-01	1,72E-01	2,29E-01	4,95E+00	9,38E-01	1,82E+00	4,50E+01	8,53E+00	1,65E+01
Kaltband Al.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kar. Alu. ⁴⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kar. ungeh. ⁵⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kieselsäure	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Krätze ^{4,6)}	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Legierungen ⁷⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NaOH	-5,95E+01	1,39E+01	3,19E+01	-	-	-	-	-	-
Pech ⁷⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Petrolkoks ⁷⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Roherz	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sand ⁷⁾	5,95E-03	3,28E-03	4,36E-03	-	-	-	-	-	-
Schmelzsatz	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Schrott neu	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Shredderschrott	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Steinsalz	1,73E+01	4,05E+00	9,29E+00	-	-	-	-	-	-
Tonerde	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Walzöl ⁷⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Warmband AL	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ausbruch	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cl ₂	-2,67E+01	6,24E+00	1,43E+01	-	-	-	-	-	-
H ₂	-7,55E-01	1,76E-01	4,05E-01	-	-	-	-	-	-
Stäube	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Em. in Luft	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg
C ₂ F ₆	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CF ₄	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CH ₄	4,46E-02	1,19E-02	-	4,47E-04	1,41E-04	2,17E-04	4,37E-02	1,14E-02	2,27E-02
CO	1,07E-02	3,71E-03	-	1,18E-04	5,84E-05	7,42E-05	1,13E-02	6,11E-03	7,44E-03
CO ₂	3,63E+01	1,11E+01	-	3,41E-01	1,13E-01	1,82E-01	3,02E+01	5,81E+00	1,12E+01
HCl	4,07E-03	1,15E-03	2,88E-03	1,31E-05	1,22E-05	1,73E-05	4,97E-03	2,99E-03	3,67E-03
HF	3,43E-04	1,07E-04	-	9,36E-07	8,02E-07	1,19E-06	1,89E-04	1,11E-04	1,37E-04
N ₂ O	5,20E-04	2,66E-04	-	3,62E-06	1,83E-06	2,33E-06	1,41E-04	6,61E-05	8,11E-05
NH ₃	5,92E-05	1,87E-05	-	1,47E-07	1,04E-07	1,56E-07	7,34E-06	3,59E-06	4,68E-06
NM ₂ VOC	4,09E-02	3,02E-02	-	6,73E-04	4,80E-04	6,14E-04	2,33E-03	1,42E-03	2,71E-03
NO _x	7,61E-02	2,94E-02	-	5,33E-04	1,56E-04	2,64E-04	2,63E-02	8,05E-03	1,56E-02
SO ₂	2,84E-01	1,60E-01	-	7,77E-04	2,11E-04	3,98E-04	5,86E-02	1,84E-02	3,11E-02
Staub	3,48E-02	1,50E-02	5,91E-02	1,91E+00	1,38E+00	2,00E+00	4,27E-01	2,23E-01	2,60E-01

¹⁾ Aluminiumwalzbarren homogenisiert

²⁾ Nettoverbrauch

⁴⁾ Aluminiumrohkarosserie

⁵⁾ Aluminiumrohkarosserie ungehärtet

Tabelle E.10: Gesamtbilanz aufgeschlüsselt nach Einzelprozessen der Herstellung und Entsorgung einer Aluminiumrohkarosserie eines Mittelklasse-Pkw, für das Szenario „Basis“. Angegeben sind Mittelwert $\langle x \rangle$, Standardabweichung des Mittelwertes m , Standardabweichung s sowie bei Teilprozessen der mittlere Stichprobenumfang $\langle n \rangle$. (Teil 3)

Prozessbezeichnung	Elektrolyse ⁹⁾			Aluminiumfluoridherstellung ⁹⁾			Anodenherstellung für Al-Elektrolyse ⁹⁾		
	$\langle x \rangle$	m	s	$\langle x \rangle$	m	s	$\langle x \rangle$	m	s
Prozessbezeichnung	2,22E+02	3,32E+01	6,85E+01	5,17E+00	1,46E+00	2,94E+00	1,03E+02	1,55E+01	3,46E+01
Energieträger	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ
Steinkohle	1,21E+04	3,61E+03	5,35E+03	2,75E+02	1,28E+02	1,36E+02	5,07E+02	2,03E+02	2,72E+02
Braunkohle	1,23E+03	2,12E+02	4,71E+02	2,60E+00	2,62E+00	3,75E+00	2,05E+01	6,17E+00	1,13E+01
Erdgas	1,12E+03	0,00E+00	0,00E+00	1,69E+00	1,70E+00	2,42E+00	6,10E+02	2,17E+02	3,61E+02
Öl	4,83E+03	2,54E+03	8,74E+02	1,14E+02	4,67E+01	5,04E+01	3,10E+01	8,51E+00	1,47E+01
E _{Fein} aus Uran ¹⁾	5,80E+03	8,68E+02	1,86E+03	4,24E+00	4,40E+00	6,46E+00	1,18E+02	3,22E+01	5,49E+01
Pot. En. Wasser	8,13E+03	1,24E+03	2,62E+03	6,59E-01	6,85E-01	1,00E+00	1,83E+01	5,03E+00	8,56E+00
Materialbedarf	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg
Abbrand	-	-	-	-	-	-	-	-	-
AlF ₃	5,17E+00	1,46E+00	2,94E+00	-5,17E+00	1,46E+00	2,94E+00	-	-	-
Alu. primär	-2,22E+02	3,32E+01	6,85E+01	-	-	-	-	-	-
Alu. sekundär	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Al. Walzbarren	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Walzb. hom. ²⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alu.-Blech	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Blech gepreßt	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Anode ³⁾	1,03E+02	1,55E+01	3,46E+01	-	-	-	-1,03E+02	1,55E+01	3,46E+01
Bauxit	-	-	-	7,91E+00	4,54E+00	5,99E+00	-	-	-
Brannkalk	-	-	-	1,44E-01	8,26E-02	1,09E-01	-	-	-
H ₂ SiF ₆ ³⁾	-	-	-	4,18E+00	2,40E+00	3,17E+00	-	-	-
Kalkstein	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kaltband Al.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kar. Alu. ⁴⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kar. ungeh. ⁵⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kieselsäure	-	-	-	-2,79E+00	1,60E+00	2,11E+00	-	-	-
Kraetz ⁶⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Legierungen ⁷⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NaOH	-	-	-	6,90E-01	3,96E-01	5,22E-01	-	-	-
Pech ⁷⁾	-	-	-	-	-	-	2,36E+01	5,22E+00	1,10E+01
Petrolkoks ⁷⁾	-	-	-	-	-	-	7,92E+01	1,27E+01	2,81E+01
Roherz	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sand ⁷⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Schmelzsatz	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Schrott neu	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Shredderschrott	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Steinsalz	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Tonerde	4,24E+02	6,34E+01	1,31E+02	-	-	-	-	-	-
Walzöl ⁷⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Warmband Al.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ausbruch	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cl ₂	-	-	-	-	-	-	-	-	-
H ₂	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Stäube	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Em. in Luft	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg
C ₂ F ₆	3,66E-02	8,27E-03	1,63E-02	-	-	-	-	-	-
CF ₄	1,60E-01	6,47E-02	1,32E-01	-	-	-	-	-	-
CH ₄	5,00E-01	1,17E-01	2,06E-01	4,94E-02	2,53E-02	3,74E-02	1,08E-01	4,55E-02	8,20E-02
CO	2,16E+01	6,79E+00	1,52E+01	1,34E-02	8,75E-03	1,10E-02	1,67E-02	9,58E-03	1,20E-02
CO ₂	1,48E+03	2,27E+02	4,75E+02	1,75E+01	7,72E+00	1,16E+01	1,12E+02	5,14E+01	6,27E+01
HCl	2,31E-01	4,32E-02	1,04E-01	5,45E-03	3,93E-03	4,77E-03	1,73E-03	5,05E-04	9,32E-04
HF	2,85E-01	1,26E-01	2,02E-02	1,25E-03	6,39E-04	8,88E-04	1,83E-04	6,14E-05	1,31E-04
N ₂ O	1,16E-02	2,43E-03	4,26E-03	2,74E-04	1,53E-04	2,16E-04	4,78E-04	2,46E-04	3,16E-04
NH ₃	4,46E-03	1,09E-03	2,79E-03	1,07E-05	5,95E-06	8,61E-06	3,40E-05	1,06E-05	2,03E-05
NM ₂ OC	5,65E-01	1,94E-01	2,49E-01	1,66E-02	1,17E-02	1,43E-02	1,19E-02	2,58E-02	5,58E-02
NO _x	2,59E+00	5,57E-01	1,19E+00	4,34E-02	1,96E-02	3,08E-02	9,98E-02	4,12E-02	5,25E-02
SO ₂	6,86E+00	1,60E+00	3,76E+00	1,51E-01	7,11E-02	1,16E-01	1,20E-01	4,70E-02	7,24E-02
Staub	2,55E+00	8,00E-01	1,28E+00	7,07E-02	3,39E-02	4,87E-02	4,91E-02	2,32E-02	2,81E-02

⁹⁾ Ohne Aluminiumanteil²⁾ Von Bereitstellung nur Energiebedarf erfasst.³⁾ Über Teilprozesse "Tonerde" mitberücksichtigt.

Tabelle E.11: Gesamtbilanz aufgeschlüsselt nach Einzelprozessen der Herstellung und Entsorgung einer Aluminiumrohkarosserie eines Mittelklasse-Pkw, für das Szenario „Basis“. Angegeben sind Mittelwert $\langle x \rangle$, Standardabweichung des Mittelwertes m , Standardabweichung s sowie bei Teilprozeßketten der mittlere Stichprobenumfang $\langle n \rangle$. (Teil 4)

	Walzbarrenherstellung			Homogenisieren			Warmwalzen von Aluminium		
	$\langle x \rangle$	m	s	$\langle x \rangle$	m	s	$\langle x \rangle$	m	s
Prozeßwichtung	3,95E+02	3,23E+01	5,60E+01	3,95E+02	3,23E+01	5,60E+01	3,95E+02	2,85E+01	4,95E+01
Energieträger	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ
Steinkohle	7,58E+01	2,21E+01	3,04E+01	5,78E+01	1,65E+01	2,14E+01	1,54E+02	4,84E+01	6,38E+01
Braunkohle	2,55E+01	3,46E+00	7,65E+00	1,94E+01	2,36E+00	4,98E+00	5,17E+01	9,29E+00	1,64E+01
Erdgas	1,03E+03	2,26E+02	5,33E+02	7,23E+02	3,40E+02	3,53E+02	3,37E+01	5,55E+00	8,83E+00
Öl	3,27E+01	3,56E+00	7,61E+00	2,49E+01	2,26E+00	4,29E+00	6,64E+01	1,06E+01	1,69E+01
E_{Pri} aus Uran ¹⁾	1,24E+02	1,31E+01	2,67E+01	9,49E+01	8,19E+00	1,39E+01	2,53E+02	3,99E+01	6,00E+01
Pot. En. Wasser	1,94E+01	2,11E+00	4,19E+00	1,48E+01	1,34E+00	2,21E+00	3,93E+01	6,31E+00	9,41E+00
Materialbedarf	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg
Abbrand	-1,19E+01	4,25E+00	9,41E+00	-	-	-	-	-	-
AlF ₃	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alu. primär	2,22E+02	3,12E+01	6,36E+01	-	-	-	-	-	-
Alu. sekundär	1,85E+02	4,89E+01	1,08E+02	-	-	-	-	-	-
Al. Walzbarren	-3,95E+02	3,23E+01	5,60E+01	3,95E+02	3,23E+01	5,60E+01	-	-	-
Walzb. hom. ²⁾	-	-	-	-3,95E+02	3,23E+01	5,60E+01	3,95E+02	3,23E+01	5,60E+01
Alu.-Blech	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Blech gepreßt	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Anode ³⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bauxit	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Brannkalk	-	-	-	-	-	-	-	-	-
H ₂ SiF ₆ ⁴⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kalkstein	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kaltband Al.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kar. Alu. ⁵⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kar. ungeh. ⁵⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kieselsäure	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kraetz ⁶⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Legierungen ⁷⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NaOH	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Pech ⁸⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Petrolkoks ⁹⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Roherz	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sand ¹⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Schmelzsatz	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Schrott neu	-	-	-	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-4,45E+01	4,93E+00	7,86E+00
Shredderschrott	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Steinsatz	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Tonerde	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Walzöl ¹⁾	-	-	-	-	-	-	6,22E-01	7,92E-02	1,23E-01
Warmband Al.	-	-	-	-	-	-	-3,50E+02	2,85E+01	4,95E+01
Ausbruch	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cl ₂	-	-	-	-	-	-	-	-	-
H ₂	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Stäube	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Em. in Luft	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg
C ₂ F ₆	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CF ₄	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CH ₄	1,79E-01	5,87E-02	1,33E-01	1,26E-01	6,83E-02	1,06E-01	1,40E-02	3,96E-03	5,55E-03
CO	2,75E-02	1,43E-02	1,92E-02	3,19E-02	1,55E-02	1,60E-02	3,42E-03	8,08E-04	1,13E-03
CO ₂	7,25E+01	1,43E+01	3,34E+01	5,16E+01	2,18E+01	2,26E+01	2,34E+01	3,72E+00	5,71E+00
HCl	2,20E-02	1,00E-02	1,04E-02	1,89E-03	3,38E-04	5,89E-04	3,75E-03	7,54E-04	1,52E-03
HF	2,39E-04	5,47E-05	1,35E-04	2,00E-04	4,57E-05	1,03E-04	3,98E-04	1,10E-04	2,71E-04
N ₂ O	7,63E-04	3,61E-04	4,87E-04	8,57E-04	3,93E-04	4,07E-04	2,26E-04	5,93E-05	1,25E-04
NH ₃	4,48E-05	8,92E-06	1,88E-05	3,79E-05	7,92E-06	1,45E-05	7,21E-05	1,71E-05	3,70E-05
NMVO	1,56E-02	4,30E-02	9,34E-02	1,57E-02	5,95E-03	6,23E-03	1,34E-02	6,52E-03	6,95E-03
NO _x	7,69E-02	2,24E-02	3,53E-02	5,53E-02	2,35E-02	2,46E-02	4,57E-02	8,33E-03	1,58E-02
SO ₂	9,62E-02	2,14E-02	4,33E-02	7,10E-02	1,99E-02	3,24E-02	1,19E-01	3,30E-02	7,56E-02
Staub	2,87E-02	9,65E-03	1,37E-02	2,90E-02	1,04E-02	1,16E-02	2,37E-02	5,38E-03	1,21E-02

¹⁾ Über Teilprozeßkette "Primäraluminiumherstellung" miterfaßt.

Tabelle E.12: Gesamtbilanz aufgeschlüsselt nach Einzelprozessen der Herstellung und Entsorgung einer Aluminiumrohkarosserie eines Mittelklasse-Pkw, für das Szenario „Basis“. Angegeben sind Mittelwert $\langle x \rangle$, Standardabweichung des Mittelwertes m , Standardabweichung s sowie bei Teilprozessen der mittlere Stichprobenumfang $\langle n \rangle$. (Teil 5)

	Kaltwalzen, Zwischenglühen			Besäumen von Aluminium-Kaltband			Pressen von Aluminiumblech		
	$\langle x \rangle$	m	s	$\langle x \rangle$	m	s	$\langle x \rangle$	m	s
Prozeßwichtung	3,50E+02	2,85E+01	4,95E+01	2,89E+02	3,49E+00	6,42E+00	2,02E+02	0,00E+00	0,00E+00
Energieträger	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ
Steinkohle	2,18E+02	8,07E+01	1,20E+02	4,39E+01	3,16E+01	5,28E+01	2,57E+02	1,25E+02	2,00E+02
Braunkohle	7,33E+01	1,95E+01	3,54E+01	1,48E+01	9,91E+00	1,73E+01	8,63E+01	3,56E+01	6,31E+01
Erdgas	2,13E+02	7,95E+01	8,56E+01	6,84E+01	5,55E+01	7,89E+01	5,62E+01	2,29E+01	3,98E+01
Öl	9,41E+01	2,38E+01	4,18E+01	1,89E+01	1,26E+01	2,19E+01	1,36E+02	4,49E+01	7,82E+01
E _{prim} aus Uran ¹⁾	3,58E+02	9,00E+01	1,56E+02	7,20E+01	4,80E+01	8,31E+01	4,21E+02	1,70E+02	2,95E+02
Pot. En. Wasser	5,57E+01	1,41E+01	2,43E+01	1,12E+01	7,47E+00	1,29E+01	6,55E+01	2,65E+01	4,59E+01
Materialbedarf	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg
Abbrand	-	-	-	-	-	-	-	-	-
AlF ₃	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alu. primär	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alu. sekundär	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Al. Walzbarren	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Walzb. hom. ²⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alu.-Blech	-	-	-	-2,89E+02	3,49E+00	6,42E+00	2,89E+02	3,49E+00	6,42E+00
Blech gepreßt	-	-	-	-	-	-	-2,02E+02	0,00E+00	0,00E+00
Anode ³⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bauxit	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Brannkalk	-	-	-	-	-	-	-	-	-
H ₂ SiF ₆ ³⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kalkstein	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kaltband Al.	-3,50E+02	2,85E+01	4,95E+01	3,50E+02	2,85E+01	4,95E+01	-	-	-
Kar. Alu. ⁴⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kar. ungeh. ⁵⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kieselsäure	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kraetz ⁶⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Legierungen ⁷⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NaOH	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Pech ⁷⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Petrolkoks ⁷⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Roherz	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sand ⁷⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Schmelzsatz	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Schrott neu	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-6,10E+01	2,82E+01	4,89E+01	-8,79E+01	3,49E+00	6,42E+00
Shredderschrott	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Steinsalz	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Tonerde	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Walzöl ¹⁾	7,69E-01	7,58E-02	1,31E-01	-	-	-	-	-	-
Warmband Al.	3,50E+02	2,85E+01	4,95E+01	-	-	-	-	-	-
Ausbruch	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cl ₂	-	-	-	-	-	-	-	-	-
H ₂	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Stäube	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Em. in Luft	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg
C ₂ F ₆	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CF ₄	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CH ₄	4,83E-02	1,74E-02	1,30E-02	1,52E-02	1,44E-02	2,08E-02	2,34E-02	1,09E-02	1,80E-02
CO	6,82E-03	1,81E-03	2,67E-03	2,76E-03	2,63E-03	3,64E-03	5,70E-03	2,51E-03	4,19E-03
CO ₂	4,41E+01	1,00E+01	1,60E+01	1,22E+01	1,04E+01	1,48E+01	3,90E+01	1,58E+01	2,74E+01
HCl	5,52E-03	1,53E-03	2,98E-03	1,41E-03	1,14E-03	1,66E-03	6,26E-03	2,64E-03	4,84E-03
HF	5,86E-04	1,97E-04	4,49E-04	1,50E-04	1,24E-04	1,94E-04	6,64E-04	3,08E-04	6,29E-04
N ₂ O	3,76E-04	1,10E-04	2,20E-04	1,21E-04	1,08E-04	1,55E-04	3,77E-04	1,72E-04	3,24E-04
NH ₃	1,06E-04	3,22E-05	6,60E-05	2,72E-05	2,23E-05	3,31E-05	1,20E-04	5,30E-05	1,00E-04
NM VOC	2,02E-02	1,03E-02	1,24E-02	5,46E-03	5,59E-03	8,62E-03	2,23E-02	1,37E-02	1,87E-02
NO _x	7,07E-02	1,78E-02	3,33E-02	2,00E-02	1,67E-02	2,39E-02	7,62E-02	3,15E-02	5,67E-02
SO ₂	1,76E-01	5,85E-02	1,27E-01	4,61E-02	3,85E-02	5,86E-02	1,98E-01	9,19E-02	1,81E-01
Staub	3,59E-02	1,03E-02	2,17E-02	9,75E-03	8,12E-03	1,20E-02	3,96E-02	1,72E-02	3,30E-02

Tabelle E.13: Gesamtbilanz aufgeschlüsselt nach Einzelprozessen der Herstellung und Entsorgung einer Aluminiumrohkarosserie eines Mittelklasse-Pkw, für das Szenario „Basis“. Angegeben sind Mittelwert $\langle x \rangle$, Standardabweichung des Mittelwertes m , Standardabweichung s sowie bei Teilprozeßketten der mittlere Stichprobenumfang $\langle n \rangle$. (Teil 6)

	Fügen einer AluKarosserie			Aushärten			Neuschrottaufbereitung		
	$\langle x \rangle$	m	s	$\langle x \rangle$	m	s	$\langle x \rangle$	m	s
Prozeßwichtung	2,02E+02	0,00E+00	0,00E+00	2,02E+02	0,00E+00	0,00E+00	1,93E+02	2,84E+01	4,93E+01
Energieträger	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ
Steinkohle	7,92E+02	3,05E+02	5,95E+02	-	-	-	1,64E+02	1,13E+02	1,59E+02
Braunkohle	2,66E+02	7,63E+01	1,87E+02	-	-	-	5,50E+01	3,52E+01	5,13E+01
Erdgas	1,74E+02	4,82E+01	1,18E+02	9,00E+02	4,23E+02	4,27E+02	7,59E+02	2,98E+02	4,38E+02
Öl	1,54E+03	9,40E+01	2,31E+02	-	-	-	1,30E+03	4,48E+01	6,44E+01
E_{prim} aus Uran ¹⁾	1,30E+03	3,56E+02	8,71E+02	-	-	-	2,69E+02	1,70E+02	2,44E+02
Pot. En. Wasser	2,02E+02	5,56E+01	1,36E+02	-	-	-	4,18E+01	2,65E+01	3,80E+01
Materialbedarf	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg
Abbrand	-	-	-	-	-	-	-	-	-
AlF ₃	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alu. primär	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alu. sekundär	-	-	-	-	-	-	-1,85E+02	2,72E+01	4,71E+01
Al. Walzbarren	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Walzb. hom. ²⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alu.-Blech	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Blech gepreßt	2,02E+02	0,00E+00	0,00E+00	-	-	-	-	-	-
Anode ³⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bauxit	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Brannkalk	-	-	-	-	-	-	-	-	-
H ₂ SiF ₆ ⁴⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kalkstein	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kaltband Al.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kar. Alu. ⁵⁾	-	-	-	-2,02E+02	0,00E+00	0,00E+00	-	-	-
Kar. ungeh. ⁵⁾	-2,02E+02	0,00E+00	0,00E+00	2,02E+02	0,00E+00	0,00E+00	-	-	-
Kieselsäure	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kraetzte ^{6,7)}	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Legierungen ⁷⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NaOH	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Pech ⁷⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Petrolkoks ⁷⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Roherz	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sand ⁷⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Schmelzsalz	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Schrott neu	-	-	-	-	-	-	1,93E+02	2,84E+01	4,93E+01
Shredderschrott	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Steinsalz	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Tonerde	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Walzöl ⁷⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Warmband Al.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ausbruch	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cl ₂	-	-	-	-	-	-	-	-	-
H ₂	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Stäube	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Em. in Luft	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg
C ₂ F ₆	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CF ₄	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CH ₄	7,23E-02	2,60E-02	5,35E-02	1,53E-01	8,55E-02	1,13E-01	1,38E-01	5,48E-02	9,47E-02
CO	1,76E-02	5,72E-03	1,24E-02	2,30E-02	1,63E-02	1,63E-02	2,21E-02	1,11E-02	1,31E-02
CO ₂	1,20E+02	3,30E+01	8,09E+01	5,42E+01	2,71E+01	2,71E+01	6,84E+01	1,03E+01	1,78E+01
HCl	1,93E-02	5,80E-03	1,44E-02	3,62E-04	2,56E-04	2,56E-04	4,28E-03	2,48E-03	3,73E-03
HF	2,05E-03	7,30E-04	1,90E-03	3,81E-05	2,69E-05	2,69E-05	4,54E-04	2,75E-04	4,58E-04
N ₂ O	1,16E-03	4,01E-04	9,73E-04	5,80E-04	4,10E-04	4,10E-04	7,06E-04	2,63E-04	3,23E-04
NH ₃	3,71E-04	1,21E-04	3,00E-04	8,21E-06	5,80E-06	5,80E-06	8,32E-05	4,83E-05	7,51E-05
NM ₂ OC	6,88E-02	3,69E-02	5,60E-02	3,35E-02	2,37E-02	2,37E-02	2,06E-02	3,20E-02	6,77E-02
NO _x	2,35E-01	6,78E-02	1,68E-01	4,83E-02	2,90E-02	2,90E-02	8,74E-02	2,35E-02	3,49E-02
SO ₂	6,11E-01	2,18E-01	5,46E-01	3,35E-02	2,03E-02	2,03E-02	1,53E-01	7,68E-02	1,27E-01
Staub	1,22E-01	3,89E-02	9,87E-02	1,51E-02	1,07E-02	1,07E-02	3,73E-02	1,40E-02	2,20E-02

¹⁰⁾ Einzelprozesse "Bauxitabbau", "Bayer-Prozeß", "Natronlauge", "Kalksteinabbau" und "Kalk-Klazinieren" bereits eingefaltet.

Tabelle E.14: Gesamtbilanz aufgeschlüsselt nach Einzelprozessen der Herstellung und Entsorgung einer Aluminiumrohkarosserie eines Mittelklasse-Pkw, für das Szenario „Basis“. Angegeben sind Mittelwert $\langle x \rangle$, Standardabweichung des Mittelwertes m , Standardabweichung s sowie bei Teilprozeßketten der mittlere Stichprobenumfang $\langle n \rangle$. (Teil 7)

	TPK Tonerdeherstellung ^{9,10)}				TPK Primäraluminiumherstellung ¹¹⁾			
	$\langle x \rangle$	m	s	$\langle n \rangle$	$\langle x \rangle$	m	s	$\langle n \rangle$
Prozeßwichtung	4,24E+02	6,34E+01	1,31E+02	0,00E+00	2,22E+02	3,32E+01	6,85E+01	0,00E+00
Energieträger	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ
Steinkohle	1,28E+03	4,39E+02	8,37E+02	4,28E+00	1,28E+04	3,58E+03	5,36E+03	1,07E+02
Braunkohle	2,22E+02	5,59E+01	1,15E+02	4,46E+00	1,25E+03	2,10E+02	4,71E+02	1,12E+02
Erdgas	1,18E+03	4,16E+02	8,32E+02	4,72E+00	1,73E+03	2,76E+02	5,30E+02	7,49E+01
Öl	5,14E+03	9,35E+02	1,72E+03	4,32E+00	5,00E+03	2,53E+03	8,85E+02	5,20E+01
E _{Atom} aus Uran ¹⁾	1,08E+03	2,62E+02	5,29E+02	4,46E+00	5,92E+03	8,61E+02	1,86E+03	1,12E+02
Pot. En. Wasser	1,68E+02	4,09E+01	8,23E+01	4,46E+00	8,15E+03	1,23E+03	2,62E+03	1,14E+02
Materialbedarf	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg
Abbrand	-	-	-	0,00E+00	-	-	-	0,00E+00
AlF ₃	-	-	-	0,00E+00	0,00E+00	2,06E+00	4,16E+00	2,50E+00
Alu. primär	-	-	-	0,00E+00	-2,22E+02	0,00E+00	6,85E+01	2,00E+00
Alu. sekundär	-	-	-	0,00E+00	-	-	-	0,00E+00
Al. Walzbarren	-	-	-	0,00E+00	-	-	-	0,00E+00
Walzb. hom. ²⁾	-	-	-	0,00E+00	-	-	-	0,00E+00
Alu.-Blech	-	-	-	0,00E+00	-	-	-	0,00E+00
Blech gepreßt	-	-	-	0,00E+00	-	-	-	0,00E+00
Anode ³⁾	-	-	-	0,00E+00	0,00E+00	2,19E+01	4,90E+01	3,30E+01
Bauxit	9,13E+02	1,39E+02	2,92E+02	9,00E+00	7,91E+00	4,54E+00	5,99E+00	1,00E+00
Brannkalk	-1,44E-01	6,13E+00	1,19E+01	2,00E+00	1,44E-01	8,26E-02	1,09E-01	1,00E+00
H ₂ SiF ₆ ⁴⁾	-	-	-	0,00E+00	4,18E+00	2,40E+00	3,17E+00	1,00E+00
Kalkstein	5,02E+01	8,58E+00	1,66E+01	1,90E+00	-	-	-	0,00E+00
Kaltband AL	-	-	-	0,00E+00	-	-	-	0,00E+00
Kar. Alu. ⁶⁾	-	-	-	0,00E+00	-	-	-	0,00E+00
Kar. ungeh. ⁷⁾	-	-	-	0,00E+00	-	-	-	0,00E+00
Kieselsäure	-	-	-	0,00E+00	-2,79E+00	1,60E+00	2,11E+00	1,00E+00
Kraetze ⁸⁾	-	-	-	0,00E+00	-	-	-	0,00E+00
Legierungen ⁹⁾	-	-	-	0,00E+00	-	-	-	0,00E+00
NaOH	-6,90E-01	1,96E+01	4,51E+01	3,49E+00	6,90E-01	3,96E-01	5,22E-01	1,00E+00
Pech ⁷⁾	-	-	-	0,00E+00	2,36E+01	5,22E+00	1,10E+01	4,00E+00
Petrolkoks ²⁾	-	-	-	0,00E+00	7,92E+01	1,27E+01	2,81E+01	4,00E+00
Rohrhz	-	-	-	-	-	-	-	-
Sand ⁷⁾	5,95E-03	3,28E-03	4,36E-03	1,00E+00	-	-	-	0,00E+00
Schmelzsatz	-	-	-	0,00E+00	-	-	-	0,00E+00
Schrott neu	-	-	-	0,00E+00	-	-	-	0,00E+00
Shredderschrott	-	-	-	0,00E+00	-	-	-	0,00E+00
Steinsalz	1,73E+01	4,05E+00	9,29E+00	2,00E+00	-	-	-	0,00E+00
Tonerde	-4,24E+02	0,00E+00	1,31E+02	2,00E+00	4,24E+02	6,34E+01	1,31E+02	5,00E+00
Walzöl ¹⁾	-	-	-	0,00E+00	-	-	-	0,00E+00
Warmband AL	-	-	-	0,00E+00	-	-	-	0,00E+00
Ausbruch	-	-	-	0,00E+00	-	-	-	0,00E+00
Cl ₂	-2,67E+01	6,24E+00	1,43E+01	2,00E+00	-	-	-	0,00E+00
H ₂	-7,55E-01	1,76E-01	4,05E-01	2,00E+00	-	-	-	0,00E+00
Stäube	-	-	-	0,00E+00	-	-	-	0,00E+00
Em. in Luft	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg
C ₂ F ₆	-	-	-	0,00E+00	3,66E-02	8,27E-03	1,63E-02	3,00E+00
CF ₄	-	-	-	0,00E+00	1,46E-01	5,21E-02	1,35E-01	5,00E+00
CH ₄	9,58E-01	1,99E-01	5,16E-01	5,60E+00	6,65E-01	1,26E-01	2,32E-01	5,85E+01
CO	2,18E-01	7,18E-02	1,51E-01	5,56E+00	2,03E+01	5,77E+00	1,55E+01	6,44E+00
CO ₂	5,41E+02	6,68E+01	1,68E+02	5,30E+00	1,61E+03	2,30E+02	4,79E+02	8,50E+01
HCl	5,53E-02	2,90E-02	6,78E-02	5,53E+00	2,38E-01	4,30E-02	1,04E-01	1,10E+02
HF	2,72E-03	1,08E-03	2,50E-03	5,45E+00	2,70E-01	1,19E-01	2,02E-02	1,61E+01
N ₂ O	8,21E-03	2,75E-03	4,55E-03	4,46E+00	1,23E-02	2,42E-03	4,32E-03	6,78E+01
NH ₃	3,05E-04	7,43E-05	1,74E-04	5,31E+00	4,51E-03	1,08E-03	2,79E-03	1,12E+02
NMVOG	7,00E-01	2,52E-01	5,10E-01	5,37E+00	6,05E-01	1,92E-01	2,67E-01	4,64E+01
NO _x	1,17E+00	2,01E-01	5,41E-01	5,23E+00	2,73E+00	5,52E-01	1,19E+00	8,13E+01
SO ₂	4,30E+00	1,04E+00	2,98E+00	5,39E+00	7,15E+00	1,58E+00	3,76E+00	6,82E+01
Staub	2,96E+00	8,87E-01	2,06E+00	3,25E+00	2,65E+00	7,86E-01	1,29E+00	5,36E+01

¹¹⁾ Einzelprozesse "Elektrolyse", "Aluminiumfluoridherstellung" und "Anodenherstellung für Al-Elektrolyse" bereits eingefaltet.

Tabelle E.15: Gesamtbilanz aufgeschlüsselt nach Einzelprozessen der Herstellung und Entsorgung einer Aluminiumrohkarosserie eines Mittelklasse-Pkw, für das Szenario „Basis“. Angegeben sind Mittelwert $\langle x \rangle$, Standardabweichung des Mittelwertes m , Standardabweichung s sowie bei Teilprozessketten der mittlere Stichprobenumfang $\langle n \rangle$. (Teil 8)

	Shredder			Transporte ¹²⁾			Sekundäraluminiumherzeugung		
	$\langle x \rangle$	m	s	$\langle x \rangle$	m	s	$\langle x \rangle$	m	s
Prozesswichtung	2,64E+02	1,32E+02	1,63E+02				0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Energieträger	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ
Steinkohle	5,34E+01	4,62E+01	6,99E+01	6,57E+00	4,23E+00	4,46E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Braunkohle	1,80E+01	1,48E+01	2,28E+01	2,21E+00	1,30E+00	1,38E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Erdgas	1,17E+01	9,62E+00	1,47E+01	1,44E+00	8,43E-01	8,60E-01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Öl	2,65E+01	2,01E+01	3,00E+01	1,34E+03	3,44E+02	3,89E+02	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
E _{prim} aus Uran ¹⁾	8,77E+01	7,19E+01	1,09E+02	1,08E+01	6,30E+00	6,34E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Pot. En. Wasser	1,36E+01	1,12E+01	1,70E+01	1,68E+00	9,81E-01	9,87E-01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Materialbedarf	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg
Abbrand	-	-	-	-	-	-	-	-	-
AlF3	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alu. primär	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alu. sekundär	-	-	-	-	-	-	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Al. Walzbarren	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Walzb. hom. ²⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alu.-Blech	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Blech gepreßt	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Anode ³⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bauxit	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Brantkalk	-	-	-	-	-	-	-	-	-
H2SiF6 ⁴⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kalkstein	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kaltband Al.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kar. Alu. ⁵⁾	2,02E+02	1,42E+02	1,72E+02	-	-	-	-	-	-
Kar. ungeh. ⁵⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kieselsäure	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kracetz ⁶⁾	-	-	-	-	-	-	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Legierungen ⁷⁾	-	-	-	-	-	-	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
NaOH	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Pech ⁷⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Petrolkoks ⁷⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Roherz	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sand ⁹⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Schmelzsalz	-	-	-	-	-	-	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Schrott neu	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Shredderschrott	-1,71E+02	8,56E+01	1,06E+02	-	-	-	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Steinsalz	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Tonerde	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Walzöl ⁹⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Warmband Al.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ausbruch	-	-	-	-	-	-	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Cl2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
H2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Stäube	-	-	-	-	-	-	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Em. in Luft	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg
C2F6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CF4	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CH4	5,23E-03	4,27E-03	6,45E-03	1,50E-01	4,67E-02	5,16E-02	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
CO	1,28E-03	1,03E-03	1,54E-03	1,46E-01	6,22E-02	6,43E-02	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
CO2	8,39E+00	6,74E+00	1,02E+01	2,02E+02	3,97E+01	4,54E+01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
HCl	1,31E-03	1,08E-03	1,70E-03	2,29E-03	1,45E-03	1,50E-03	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
HF	1,38E-04	1,18E-04	2,01E-04	5,66E-05	2,22E-05	2,52E-05	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
N2O	8,44E-05	6,83E-05	1,10E-04	2,42E-03	1,14E-03	1,51E-03	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
NH3	2,51E-05	2,10E-05	3,39E-05	2,32E-05	1,09E-05	1,15E-05	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
NM VOC	5,26E-03	4,56E-03	6,51E-03	2,77E-01	1,26E-01	1,32E-01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
NOx	1,66E-02	1,33E-02	2,05E-02	1,03E+00	4,91E-01	5,10E-01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
SO2	4,50E-02	3,63E-02	6,00E-02	2,89E+00	7,21E-01	1,07E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Staub	9,13E-03	7,17E-03	1,14E-02	1,63E-01	5,52E-02	5,88E-02	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00

¹²⁾ Wichtung der Transporte über Produkt aus Transportentfernung (siehe Abschnitt 4.2.6) und gewichteter Bedarf im Zielprozeß.

Konventionelle Stahlrohkarosserie im Szenario „günstig“

Tabelle E.16: Gesamtbilanz aufgeschlüsselt nach Einzelprozessen der Herstellung und Entsorgung einer Stahlrohkarosserie eines Mittelklasse-Pkw, für das Szenario „günstig“. Angegeben sind Mittelwert $\langle x \rangle$, Standardabweichung des Mittelwertes m , Standardabweichung s sowie bei Teilprozessketten der mittlere Stichprobenumfang $\langle n \rangle$. (Teil 1)

Prozesskategorie	Erzabbau			Pelletieren		
	$\langle x \rangle$	m	s	$\langle x \rangle$	m	s
Prozesskategorie						
Energieträger	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ
Steinkohle	3,47E+03	8,40E+02	1,14E+03	1,85E+00	2,14E+00	5,07E+00
Braunkohle	4,74E+02	7,20E+01	9,91E+01	-	-	-
Erdgas	1,13E+03	1,61E+02	3,70E+02	-	-	-
Öl	1,26E+03	2,76E+02	3,67E+02	9,50E-01	1,04E+00	2,47E+00
En ₁₇₃ aus Uran ¹⁾	2,31E+03	3,39E+02	4,24E+02	-	-	-
Pot. En. Wasser	3,60E+02	5,30E+01	6,61E+01	-	-	-
Gichtgas	2,78E+01	8,94E+01	1,60E+02	-	-	-
Koksgas	2,59E+02	2,37E+02	3,38E+02	-	-	-
-	-3,45E+01	4,05E+01	9,69E+01	-	-	-
Konvertergas	-6,75E+01	1,94E+01	4,46E+01	-	-	-
Materialbedarf	kg	kg	kg	kg	kg	kg
Bauxit ²⁾	1,03E+00	5,50E-01	6,83E-01	-	-	-
Bentonit ²⁾	5,03E-02	6,09E-02	1,42E-01	-	-	-
Brandkalk	0,00E+00	6,65E+00	7,66E+00	-	-	-
Eisenerz	0,00E+00	1,66E+01	3,95E+01	1,77E+01	1,66E+01	3,95E+01
Sinter	0,00E+00	1,52E+01	3,65E+01	-	-	-
Pellets	0,00E+00	7,66E+00	1,85E+01	-	-	-
Elektrode	0,00E+00	4,71E-01	4,99E-01	-	-	-
H ₂ SO ₄ ²⁾	1,44E+01	7,93E+00	1,36E+01	-	-	-
Kalkstein	5,13E+01	6,56E+00	9,39E+00	-	-	-
Karosserie ²⁾	0,00E+00	2,19E+02	2,19E+02	-	-	-
Legierungen ²⁾	4,66E+00	2,51E+00	2,44E+00	-	-	-
Pech ²⁾	1,91E-01	1,16E-01	1,14E-01	-	-	-
Petrolkoks ²⁾	7,62E-01	4,65E-01	4,58E-01	-	-	-
Roheisen	0,00E+00	1,97E+01	4,72E+01	-	-	-
Roherz	3,88E+01	2,83E+01	6,79E+01	3,88E+01	2,83E+01	6,79E+01
Roherz	0,00E+00	1,20E+02	1,36E+02	-	-	-
Sauerstoff ²⁾	5,38E+01	2,24E+01	3,13E+01	-	-	-
Schlacke u.ä. ²⁾	1,18E+00	1,08E+00	2,41E+00	-	-	-
Schrott	3,05E+02	1,32E+02	1,43E+02	-	-	-
Shredderschrott	-2,79E+02	1,40E+02	1,40E+02	-	-	-
Stahlblech	0,00E+00	1,06E+01	3,89E+01	-	-	-
Stahlbl. gepr. ²⁾	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-	-	-
Vorbrammen	0,00E+00	2,68E+01	6,39E+01	-	-	-
Walzöl ²⁾	5,97E-01	1,91E-01	3,32E-01	-	-	-
Warmband	0,00E+00	2,27E+01	5,60E+01	-	-	-
Zuschläge ²⁾	3,73E+00	2,45E+00	4,95E+00	-	-	-
Ausbruch	-9,90E+00	5,01E+00	4,90E+00	-	-	-
Auswurf	-1,41E+00	7,50E-01	9,32E-01	-	-	-
Robbenzol	-4,73E-02	5,74E-02	1,37E-01	-	-	-
Rohteer	-1,97E-01	2,38E-01	5,70E-01	-	-	-
Schlacke	-3,39E+01	8,09E+00	1,33E+01	-	-	-
Stäube	-1,12E+01	4,10E+00	5,90E+00	-	-	-
Walzzunder	-1,12E+01	3,92E+00	1,08E+01	-	-	-
Schlamm ²⁾	-4,08E+00	1,12E+00	2,27E+00	-	-	-
Em. in Luft	kg	kg	kg	kg	kg	kg
C2F6	-	-	-	-	-	-
CF4	-	-	-	-	-	-
CH4	9,21E-01	2,05E-01	2,99E-01	2,20E-04	2,63E-04	6,04E-04
CO	3,16E+00	1,35E+00	2,10E+00	1,45E-03	1,74E-03	3,84E-03
CO2	4,86E+02	7,09E+01	8,54E+01	4,36E-01	5,05E-01	1,18E+00
HCl	1,02E-01	3,37E-02	3,41E-02	5,88E-05	6,93E-05	1,61E-04
HF	6,18E-03	1,53E-03	1,97E-03	6,24E-06	7,45E-06	1,75E-05
N2O	4,71E-03	1,02E-03	1,34E-03	3,54E-06	4,22E-06	9,81E-06
NH3	1,23E-03	6,72E-04	1,82E-03	1,13E-06	1,34E-06	3,12E-06
NMVOG	2,50E-01	5,72E-02	1,01E-01	2,09E-04	2,64E-04	5,79E-04
NOx	1,07E+00	2,02E-01	2,58E-01	6,03E-03	7,16E-03	1,59E-02
SO2	2,20E+00	4,67E-01	7,19E-01	2,18E-03	2,57E-03	6,01E-03
Staub	1,94E+00	8,21E-01	1,15E+00	4,83E-02	6,97E-02	1,41E-01

¹⁾ exclusive Bereitstellung

²⁾ Auf Basis des thermischen Wirkungsgrades von Kernkraftwerken (siehe Abschnitt 4.2.5).

³⁾ Stahlrohkarosserie

Tabelle E.17: Gesamtbilanz aufgeschlüsselt nach Einzelprozessen der Herstellung und Entsorgung einer Stahlrohkarosserie eines Mittelklasse-Pkw, für das Szenario „günstig“. Angegeben sind Mittelwert $\langle x \rangle$, Standardabweichung des Mittelwertes m , Standardabweichung s sowie bei Teilprozessketten der mittlere Stichprobenumfang $\langle n \rangle$. (Teil 2)

	Kalksteinabbau			Kalk-Kalziniere			Sintern		
	$\langle x \rangle$	m	s	$\langle x \rangle$	m	s	$\langle x \rangle$	m	s
Prozessleistung	2,52E+01	6,50E+00	9,32E+00	1,78E+01	1,37E+00	3,16E+00	1,01E+01	1,08E+01	2,58E+01
Energieträger	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ
Steinkohle	2,35E-01	1,65E-01	2,33E-01	1,20E+02	3,38E+01	4,48E+01	7,51E-01	8,27E-01	1,94E+00
Braunkohle	4,23E-02	4,38E-02	6,25E-02	8,19E-01	1,99E-01	3,65E-01	2,53E-01	2,70E-01	6,50E-01
Erdgas	1,23E-01	9,86E-02	1,40E-01	2,10E+01	1,92E+01	2,65E+01	1,65E-01	1,76E-01	4,23E-01
Öl	2,11E+00	1,17E+00	1,66E+00	3,49E+00	1,64E+00	2,28E+00	3,16E-01	3,46E-01	8,33E-01
E_{prim} aus Uran ¹⁾	2,07E-01	2,13E-01	3,02E-01	4,00E+00	9,07E-01	1,59E+00	1,23E+00	1,32E+00	3,16E+00
Pot. En. Wasser	3,21E-02	3,32E-02	4,70E-02	5,88E-01	1,35E-01	2,36E-01	1,92E-01	2,05E-01	4,92E-01
Gichtgas	-	-	-	-	-	-	1,26E-01	1,62E-01	5,20E-01
Koksgas	-	-	-	-	-	-	1,47E+00	1,76E+00	5,02E+00
Konvertergas	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Materialbedarf	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg
Bauxit ¹⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bentonit ¹⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Brannkalk	-	-	-	-1,78E+01	1,37E+00	3,16E+00	6,71E-02	8,37E-02	2,02E-01
Eisenerz	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sinter	-	-	-	-	-	-	-1,01E+01	1,08E+01	2,58E+01
Pellets	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Elektrode	-	-	-	-	-	-	-	-	-
H ₂ SO ₄ ¹⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kalkstein	2,78E+00	7,15E-01	1,03E+00	3,47E+01	2,81E+00	6,28E+00	-	-	-
Karosserie ²⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Legierungen ¹⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Pech ³⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Petrolkoks ³⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Roheisen	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Rohrherz	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Rohstahl	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sauerstoff ²⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Schlacke u.ä. ⁴⁾	-	-	-	-	-	-	8,77E-01	1,03E+00	2,28E+00
Schrott	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Shredderschrott	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Stahlblech	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Stahlbl. gepr. ⁵⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Vorbrannen	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Walzöl ¹⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Warmband	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Zuschläge ²⁾	-	-	-	-	-	-	1,52E+00	1,79E+00	3,94E+00
Ausbruch	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Auswurf	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Rohbenzol	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Rohrteer	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Schlacke	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Stäube	-	-	-	-	-	-	1,21E-01	1,35E-01	3,12E-01
Walzzunder	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Schlamm ⁶⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Em. in Luft	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg
C ₂ F ₆	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CF ₄	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CH ₄	2,51E-04	9,03E-05	1,22E-04	3,37E-02	6,57E-03	1,34E-02	1,88E-03	2,31E-03	5,39E-03
CO	6,62E-05	3,47E-05	4,17E-05	8,68E-03	4,47E-03	4,87E-03	9,43E-02	1,10E-01	2,70E-01
CO ₂	1,92E-01	7,17E-02	1,02E-01	2,33E+01	2,02E+00	4,36E+00	1,65E+00	1,76E+00	4,47E+00
HCl	7,36E-06	6,94E-06	9,69E-06	3,83E-03	2,21E-03	2,47E-03	4,54E-04	5,26E-04	1,29E-03
HF	5,25E-07	4,59E-07	6,70E-07	1,46E-04	8,17E-05	9,20E-05	7,69E-05	8,94E-05	2,19E-04
N ₂ O	2,03E-06	1,08E-06	1,31E-06	1,09E-04	4,74E-05	5,04E-05	5,16E-05	6,00E-05	1,42E-04
NH ₃	8,22E-08	6,03E-08	8,78E-08	5,66E-06	2,59E-06	3,02E-06	3,39E-07	3,66E-07	8,83E-07
NM ₂ OC	3,77E-04	2,77E-04	3,45E-04	1,79E-03	1,05E-03	1,95E-03	8,67E-04	9,45E-04	2,36E-03
NO _x	2,99E-04	1,02E-04	1,49E-04	2,02E-02	5,14E-03	9,80E-03	6,68E-03	7,15E-03	1,83E-02
SO ₂	4,36E-04	1,41E-04	2,24E-04	4,52E-02	1,19E-02	1,86E-02	1,41E-02	1,51E-02	3,83E-02
Staub	1,07E+00	7,94E-01	1,12E+00	3,29E-01	1,62E-01	1,65E-01	5,47E-03	5,93E-03	1,49E-02

¹⁾ Von Bereitstellung nur Energiebedarf erfasst.

⁴⁾ Abbrände, Schlacken, Zunder, Stäube

⁵⁾ Stahlblech gepreßt

Tabelle E.18: Gesamtbilanz aufgeschlüsselt nach Einzelprozessen der Herstellung und Entsorgung einer Stahlrohkarosserie eines Mittelklasse-Pkw, für das Szenario „günstig“. Angegeben sind Mittelwert $\langle x \rangle$, Standardabweichung des Mittelwertes m , Standardabweichung s sowie bei Teilprozeßketten der mittlere Stichprobenumfang $\langle n \rangle$. (Teil 3)

	Hochofen			Steinkohleförderung			Kokserzeugung		
	$\langle x \rangle$	m	s	$\langle x \rangle$	m	s	$\langle x \rangle$	m	s
Prozeßwichtung	1,13E+01	1,19E+01	2,85E+01	5,99E+00	6,89E+00	1,65E+01	4,24E+00	5,11E+00	1,22E+01
Energieträger	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ
Steinkohle	4,26E+01	4,33E+01	1,05E+02	1,16E+00	1,47E+00	3,27E+00	2,68E+02	3,17E+02	7,53E+02
Braunkohle	7,65E-01	8,19E-01	1,97E+00	-	-	-	1,51E-01	1,83E-01	4,41E-01
Endgas	2,33E+00	2,02E+00	5,16E+00	-	-	-	6,00E-01	7,89E-01	1,87E+00
Öl	7,54E+00	7,95E+00	2,19E+01	1,06E+01	6,11E+00	7,00E+00	1,94E-01	2,34E-01	5,65E-01
E_{neu} aus Uran ¹⁾	3,74E+00	3,99E+00	9,59E+00	-	-	-	7,39E-01	8,91E-01	2,15E+00
Pot. En. Wasser	5,81E-01	6,20E-01	1,49E+00	-	-	-	1,15E-01	1,39E-01	3,34E-01
Gichtgas	-5,07E+01	5,04E+01	1,21E+02	-	-	-	4,80E+00	6,19E+00	1,42E+01
Koksgas	1,05E+01	1,11E+01	2,84E+01	-	-	-	1,02E+01	1,22E+01	2,89E+01
Konvertergas	-	-	-	-	-	-	-3,45E+01	4,05E+01	9,69E+01
Materialbedarf	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg
Bauxit ²⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bentonit ²⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Braunkalk	3,38E-01	3,96E-01	8,73E-01	-	-	-	-	-	-
Eisenerz	(8) 1,55E+01	1,65E+01	3,94E+01	-	-	-	-	-	-
Sinter	1,01E+01	1,08E+01	2,58E+01	-	-	-	-	-	-
Pellets	4,96E+00	5,42E+00	1,30E+01	-	-	-	-	-	-
Elektrode	-	-	-	-	-	-	-	-	-
H ₂ SO ₄ ²⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kalkstein	(8) 1,54E+00	1,64E+00	3,91E+00	-	-	-	-	-	-
Karosserie ²⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Legierungen ²⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Pech ²⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Petrolkoks ²⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Roheisen	-1,50E+01	1,19E+01	2,85E+01	-	-	-	-	-	-
Roherz	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Rohstahl	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sauerstoff ²⁾	1,84E-01	2,69E-01	5,03E-01	-	-	-	-	-	-
Schlacke u.ä. ²⁾	3,04E-01	3,32E-01	7,79E-01	-	-	-	-	-	-
Schrott	3,75E-02	4,11E-02	9,63E-02	-	-	-	-	-	-
Shredderschrott	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Stahlblech	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Stahlbl. gepr. ²⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Vorbraunen	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Walzöl ²⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Warmband	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Zuschläge ²⁾	2,34E-01	2,54E-01	6,03E-01	-	-	-	-	-	-
Ausbruch	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Auswurf	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Rohbenzol	-	-	-	-	-	-	-4,73E-02	5,74E-02	1,37E-01
Rohteer	-	-	-	-	-	-	-1,97E-01	2,38E-01	5,70E-01
Schlacke	-3,45E+00	3,67E+00	8,81E+00	-	-	-	-	-	-
Stäube	-1,39E-01	1,49E-01	3,55E-01	-	-	-	-	-	-
Walzzunder	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Schlamm ²⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Em. in Luft	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg
C ₂ F ₆	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CF ₄	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CH ₄	6,64E-04	7,53E-04	1,91E-03	6,91E-02	8,63E-02	1,93E-01	4,70E-04	5,90E-04	1,48E-03
CO	2,52E-03	3,09E-03	7,75E-03	6,33E-04	7,91E-04	1,78E-03	4,01E-03	4,98E-03	1,20E-02
CO ₂	1,39E+01	1,48E+01	1,27E+01	7,74E-01	8,93E-01	2,14E+00	3,00E+00	3,62E+00	8,67E+00
HCl	8,99E-05	9,89E-05	2,41E-04	2,89E-04	3,60E-04	8,09E-04	8,30E-06	1,05E-05	2,45E-05
HF	7,59E-06	8,22E-06	1,99E-05	1,21E-05	1,48E-05	3,37E-05	5,12E-06	6,48E-06	1,49E-05
N ₂ O	2,01E-05	2,16E-05	5,18E-05	9,35E-06	1,12E-05	2,60E-05	5,00E-07	6,35E-07	1,49E-06
NH ₃	1,27E-06	1,36E-06	3,27E-06	7,23E-07	8,76E-07	2,03E-06	4,90E-04	6,60E-04	1,81E-03
NM ₂ VOC	3,10E-04	3,45E-04	8,06E-04	4,36E-04	5,23E-04	1,21E-03	1,51E-03	1,95E-03	4,42E-03
NO _x	4,38E-03	4,72E-03	1,14E-02	1,76E-03	2,04E-03	4,90E-03	3,22E-03	3,90E-03	9,41E-03
SO ₂	4,76E-03	5,15E-03	1,26E-02	4,24E-03	4,88E-03	1,17E-02	2,66E-03	3,23E-03	7,87E-03
Staub	1,66E-03	1,88E-03	4,90E-03	1,69E-03	2,03E-03	4,70E-03	1,17E-03	1,43E-03	3,54E-03

¹⁾ Walzzunderschlamm

²⁾ Im Hochofenprozeß miterfaßt.

(8) Einträge über Pellets und Sinter miterfaßt um Kovarianzen zu berücksichtigen.

Tabelle E.19: Gesamtbilanz aufgeschlüsselt nach Einzelprozessen der Herstellung und Entsorgung einer Stahlrohkarosserie eines Mittelklasse-Pkw, für das Szenario „günstig“. Angegeben sind Mittelwert $\langle x \rangle$, Standardabweichung des Mittelwertes m , Standardabweichung s sowie bei Teilprozessketten der mittlere Stichprobenumfang $\langle n \rangle$. (Teil 4)

	Oxygenstahlerzeugung			Strangguß ⁹⁾			Warmwalzen ⁹⁾		
	$\langle x \rangle$	m	s	$\langle x \rangle$	m	s	$\langle x \rangle$	m	s
Prozesswichtung	9,80E+01	1,77E+01	4,23E+01	5,01E+02	1,89E+01	4,52E+01	4,77E+02	1,60E+01	3,96E+01
Energieträger	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ
Steinkohle	8,92E+00	2,83E+00	4,96E+00	1,04E+02	3,51E+01	3,77E+01	3,78E+02	2,06E+02	2,88E+02
Braunkohle	2,76E+00	5,69E-01	1,37E+00	8,10E+00	2,60E+00	4,14E+00	3,65E+01	3,67E+00	8,75E+00
Erdgas	1,63E+01	7,68E+00	1,40E+01	5,28E+00	1,25E+00	2,53E+00	2,43E+02	2,08E+02	2,95E+02
Öl	4,86E+00	1,44E+00	2,91E+00	1,04E+01	2,43E+00	4,93E+00	2,42E+02	1,69E+02	2,39E+02
Elektr. aus Uran ¹⁾	1,33E+01	2,52E+00	6,08E+00	3,96E+01	9,16E+00	1,84E+01	1,78E+02	9,31E+00	2,05E+01
Pot. En. Wasser	2,06E+00	3,97E-01	9,47E-01	6,15E+00	1,44E+00	2,87E+00	2,77E+01	1,66E+00	3,29E+00
Gichtgas	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Koksgas	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Konvertergas	-6,75E+01	1,94E+01	4,46E+01	-	-	-	-	-	-
Materialbedarf	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg
Bauxit ²⁾	1,03E+00	5,50E-01	6,83E-01	-	-	-	-	-	-
Bentonit ²⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Brantkalk	6,70E+00	1,37E+00	3,16E+00	-	-	-	-	-	-
Eisenerz	2,14E+00	1,89E+00	3,33E+00	-	-	-	-	-	-
Sinter	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Pellets	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Elektrode	-	-	-	-	-	-	-	-	-
H ₂ SO ₄ ³⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kalkstein	4,90E-01	2,61E-01	3,24E-01	-	-	-	-	-	-
Karosserie ³⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Legierungen ³⁾	4,90E-01	2,61E-01	3,24E-01	-	-	-	-	-	-
Pech ³⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Petrolkoks ³⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Roheisen	1,50E+01	1,57E+01	3,75E+01	-	-	-	-	-	-
Roherz	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Rohstahl	-1,48E+02	1,77E+01	4,23E+01	5,19E+02	1,97E+01	4,70E+01	-	-	-
Sauerstoff ³⁾	8,23E+00	1,83E+00	4,28E+00	-	-	-	-	-	-
Schlacke u.ä. ⁴⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Schrott	9,32E+01	7,99E+00	9,65E+00	-1,80E+01	1,91E+00	3,92E+00	-1,46E+01	4,09E+00	7,87E+00
Shredderschrott	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Stahlblech	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Stahlbl. gepr. ⁵⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Vorbrammen	-	-	-	-5,01E+02	1,89E+01	4,52E+01	5,01E+02	1,89E+01	4,52E+01
Walzöl ⁶⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Warmband	-	-	-	-	-	-	-4,77E+02	1,60E+01	3,96E+01
Zuschläge ⁷⁾	1,98E+00	1,66E+00	2,93E+00	-	-	-	-	-	-
Ausbruch	-1,57E+00	4,08E-01	7,37E-01	-	-	-	-	-	-
Auswurf	-1,41E+00	7,50E-01	9,32E-01	-	-	-	-	-	-
Rohbenzol	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Rohleer	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Schlacke	-1,17E+01	2,33E+00	5,58E+00	-	-	-	-	-	-
Stäube	-3,11E+00	1,37E+00	2,55E+00	-	-	-	-	-	-
Walzrunder	-	-	-	-	-	-	-1,01E+01	5,27E+00	1,14E+01
Schlamm ⁸⁾	-	-	-	-	-	-	-4,99E+00	1,48E+00	2,08E+00
Em. in Luft	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg
C ₂ F ₆	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CF ₄	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CH ₄	6,58E-03	2,94E-03	5,52E-03	2,51E-02	1,20E-02	1,42E-02	1,38E-01	5,42E-02	8,13E-02
CO	1,10E+00	2,01E-01	4,77E-01	6,74E-03	4,47E-03	4,51E-03	3,26E-02	2,15E-02	2,87E-02
CO ₂	4,83E+00	1,33E+00	2,79E+00	8,67E+00	2,97E+00	3,36E+00	6,30E+01	1,99E+01	2,85E+01
HCl	3,82E-04	1,99E-04	3,52E-04	3,43E-03	2,09E-03	2,13E-03	1,20E-02	1,02E-02	1,38E-02
HF	2,80E-05	9,50E-06	2,08E-05	1,59E-04	7,89E-05	8,82E-05	6,27E-04	3,72E-04	5,27E-04
N ₂ O	3,17E-05	1,42E-05	2,49E-05	9,88E-05	5,06E-05	5,45E-05	8,58E-04	4,67E-04	6,54E-04
NH ₃	4,14E-06	1,12E-06	2,61E-06	1,25E-05	3,70E-06	6,74E-06	6,74E-05	1,65E-05	3,05E-05
NM VOC	1,79E-02	8,99E-03	1,15E-02	2,45E-03	1,04E-03	1,28E-03	4,94E-02	4,20E-02	5,83E-02
NO _x	1,25E-02	4,75E-03	7,12E-03	2,00E-02	7,59E-03	9,94E-03	1,27E-01	7,21E-02	1,04E-01
SO ₂	1,09E-02	4,59E-03	9,05E-03	4,75E-02	1,73E-02	2,15E-02	4,07E-01	3,12E-01	4,59E-01
Staub	1,66E-02	6,33E-03	1,20E-02	9,38E-03	4,60E-03	5,03E-03	5,63E-02	3,47E-02	4,81E-02

⁹⁾ Über Teilprozesskette "Blechherstellung" miteinfaßt.

Tabelle E.20: Gesamtbilanz aufgeschlüsselt nach Einzelprozessen der Herstellung und Entsorgung einer Stahlrohkarosserie eines Mittelklasse-Pkw, für das Szenario „günstig“. Angegeben sind Mittelwert $\langle x \rangle$, Standardabweichung des Mittelwertes m , Standardabweichung s sowie bei Teilprozessketten der mittlere Stichprobenumfang $\langle n \rangle$. (Teil 5)

	Kaltwalzen ⁹⁾			Pressen, Stanzen			Fügen einer Stahlkarosserie		
	$\langle x \rangle$	m	s	$\langle x \rangle$	m	s	$\langle x \rangle$	m	s
Prozeßwichtung	4,33E+02	1,06E+01	2,75E+01	3,10E+02	0,00E+00	0,00E+00	3,10E+02	0,00E+00	0,00E+00
Energieträger	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ
Steinkohle	1,89E+02	5,66E+01	7,81E+01	2,18E+02	8,34E+01	1,38E+02	3,08E+02	8,36E+01	1,04E+02
Braunkohle	6,37E+01	9,63E+00	2,00E+01	7,33E+01	2,07E+01	4,19E+01	1,03E+02	8,88E+00	2,17E+01
Erdgas	5,61E+02	1,11E+02	1,90E+02	4,78E+01	1,31E+01	2,59E+01	6,74E+01	3,20E+00	7,44E+00
Öl	2,03E+02	1,12E+02	1,94E+02	9,41E+01	2,55E+01	5,07E+01	1,33E+02	3,80E+00	1,19E+01
E _{pot} aus Uran ¹⁾	3,11E+02	3,87E+01	7,28E+01	3,58E+02	9,64E+01	1,90E+02	5,05E+02	2,01E+00	2,67E+00
Pot. En. Wasser	4,84E+01	6,18E+00	1,14E+01	5,57E+01	1,51E+01	2,96E+01	7,86E+01	2,31E+00	2,33E+00
Gichtgas	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Koksgas	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Konvertergas	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Materialbedarf	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg
Bauxit ¹⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bentonit ¹⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Brannkalk	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Eisenerz	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-	-	-	-	-	-
Sinter	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Pellets	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Elektrode	-	-	-	-	-	-	-	-	-
H ₂ SO ₄ ¹⁾	1,44E+01	7,93E+00	1,36E+01	-	-	-	-	-	-
Kalkstein	1,12E+01	5,63E+00	5,67E+00	-	-	-	-	-	-
Karosserie ²⁾	-	-	-	-	-	-	-3,10E+02	0,00E+00	0,00E+00
Legierungen ¹⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Pech ¹⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Petrolkoks ¹⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Roheisen	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Rohertz	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Rohstahl	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sauerstoff ¹⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Schlacke u.ä. ¹⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Schrott	-4,42E+01	1,10E+01	2,56E+01	-1,23E+02	1,06E+01	2,75E+01	-	-	-
Shredderschrott	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Stahlblech	-4,33E+02	1,06E+01	2,75E+01	4,33E+02	1,06E+01	2,75E+01	-	-	-
Stahlbl. gepr. ¹⁾	-	-	-	-3,10E+02	0,00E+00	0,00E+00	3,10E+02	0,00E+00	0,00E+00
Vorbrammen	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Walzöl ¹⁾	5,97E-01	1,91E-01	3,32E-01	-	-	-	-	-	-
Warmband	4,77E+02	1,60E+01	3,96E+01	-	-	-	-	-	-
Zuschläge ¹⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ausbruch	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Auswurf	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Rohbenzol	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Rohteer	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Schlacke	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Stäube	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Walzzunder	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Schlamm ¹⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Em. in Luft	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg
C ₂ F ₆	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CF ₄	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CH ₄	1,82E-01	5,62E-02	7,64E-02	1,99E-02	7,09E-03	1,23E-02	2,81E-02	6,55E-03	8,87E-03
CO	3,46E-02	1,57E-02	2,84E-02	4,84E-03	1,56E-03	2,80E-03	6,83E-03	1,21E-03	1,57E-03
CO ₂	7,56E+01	1,05E+01	1,82E+01	3,31E+01	8,95E+00	1,77E+01	4,67E+01	1,03E+00	2,66E+00
HCl	1,70E-02	9,07E-03	1,29E-02	5,32E-03	1,58E-03	3,33E-03	7,50E-03	9,35E-04	2,47E-03
HF	9,14E-04	3,52E-04	5,57E-04	5,64E-04	1,99E-04	4,72E-04	7,96E-04	1,82E-04	5,09E-04
N ₂ O	9,76E-04	2,76E-04	4,27E-04	3,20E-04	1,09E-04	2,35E-04	4,52E-04	9,49E-05	2,26E-04
NH ₃	9,83E-05	2,04E-05	4,36E-05	1,02E-04	3,29E-05	7,18E-05	1,44E-04	2,54E-05	6,55E-05
NM ₂ VOC	5,39E-02	4,01E-02	5,68E-02	1,89E-02	1,01E-02	1,34E-02	2,67E-02	1,23E-02	1,24E-02
NO _x	1,54E-01	4,34E-02	6,55E-02	6,47E-02	1,84E-02	3,81E-02	9,13E-02	8,38E-03	2,31E-02
SO ₂	4,23E-01	1,68E-01	3,04E-01	1,68E-01	5,94E-02	1,35E-01	2,37E-01	5,43E-02	1,40E-01
Staub	6,47E-02	2,04E-02	3,18E-02	3,36E-02	1,06E-02	2,36E-02	4,74E-02	7,73E-03	2,14E-02

Tabelle E.21: Gesamtbilanz aufgeschlüsselt nach Einzelprozessen der Herstellung und Entsorgung einer Stahlrohkarosserie eines Mittelklasse-Pkw, für das Szenario „günstig“. Angegeben sind Mittelwert $\langle x \rangle$, Standardabweichung des Mittelwertes m , Standardabweichung s sowie bei Teilprozessen der mittlere Stichprobenumfang $\langle n \rangle$. (Teil 6)

	TFK Blechherstellung ¹⁰⁾				Shredder		
	$\langle x \rangle$	m	s	$\langle n \rangle$	$\langle x \rangle$	m	s
Prozeßwichtung	4,33E+02	1,06E+01	2,75E+01	0,00E+00	2,79E+02	1,40E+02	1,40E+02
Energieträger	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ
Steinkohle	4,04E+02	2,24E+02	3,27E+02	6,82E+00	5,66E+01	4,89E+01	6,22E+01
Braunkohle	9,05E+01	1,78E+01	2,87E+01	8,00E+00	1,90E+01	1,57E+01	2,03E+01
Erdgas	8,34E+02	1,54E+02	3,64E+02	5,77E+00	1,24E+01	1,02E+01	1,30E+01
Öl	2,73E+02	1,56E+02	2,76E+02	6,69E+00	2,81E+01	2,13E+01	2,66E+01
E _{netto} aus Uran ¹⁾	4,42E+02	8,71E+01	1,15E+02	8,00E+00	9,29E+01	7,62E+01	9,72E+01
Pot. En. Wasser	6,87E+01	1,36E+01	1,79E+01	8,00E+00	1,44E+01	1,19E+01	1,51E+01
Gichtgas	7,35E+01	7,36E+01	1,04E+02	2,00E+00	-	-	-
Koksgas	2,37E+02	2,37E+02	3,35E+02	2,00E+00	-	-	-
-	-	-	-	0,00E+00	-	-	-
Konvertergas	-	-	-	0,00E+00	-	-	-
Materialbedarf	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg
Bauxit ²⁾	-	-	-	0,00E+00	-	-	-
Bentonit ³⁾	-	-	-	0,00E+00	-	-	-
Brannkalk	-	-	-	0,00E+00	-	-	-
Eisenerz	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-	-	-
Sinter	-	-	-	0,00E+00	-	-	-
Pellets	-	-	-	0,00E+00	-	-	-
Elektrode	-	-	-	0,00E+00	-	-	-
H ₂ SO ₄ ⁴⁾	1,44E+01	7,93E+00	1,36E+01	3,00E+00	-	-	-
Kalkstein	1,12E+01	5,63E+00	5,67E+00	1,00E+00	-	-	-
Karosserie ⁵⁾	-	-	-	0,00E+00	3,10E+02	2,19E+02	2,19E+02
Legierungen ⁶⁾	-	-	-	0,00E+00	-	-	-
Pech ³⁾	-	-	-	0,00E+00	-	-	-
Petrolkoks ³⁾	-	-	-	0,00E+00	-	-	-
Roheisen	-	-	-	0,00E+00	-	-	-
Rohrert	-	-	-	-	-	-	-
Rohstahl	5,01E+02	2,11E+01	4,95E+01	7,00E+00	-	-	-
Sauerstoff ⁷⁾	-	-	-	0,00E+00	-	-	-
Schlacke u.ä. ⁴⁾	-	-	-	0,00E+00	-	-	-
Schrott	-5,26E+01	2,80E+01	4,90E+01	9,34E+00	-	-	-
Shredderschrott	-	-	-	0,00E+00	-2,79E+02	1,40E+02	1,40E+02
Stahlblech	-4,33E+02	0,00E+00	2,75E+01	2,00E+00	-	-	-
Stahlbl. gepr. ⁵⁾	-	-	-	0,00E+00	-	-	-
Vorbrammen	0,00E+00	2,68E+01	6,39E+01	3,00E+00	-	-	-
Walzöl ³⁾	5,97E-01	1,91E-01	3,32E-01	3,00E+00	-	-	-
Warmband	0,00E+00	2,27E+01	5,60E+01	3,50E+00	-	-	-
Zuschläge ⁸⁾	-	-	-	0,00E+00	-	-	-
Ausbruch	-	-	-	0,00E+00	-	-	-
Auswurf	-	-	-	0,00E+00	-	-	-
Rohbenzol	-	-	-	0,00E+00	-	-	-
Rohteer	-	-	-	0,00E+00	-	-	-
Schlacke	-	-	-	0,00E+00	-	-	-
Stäube	-	-	-	0,00E+00	-	-	-
Walzzunder	-1,12E+01	3,92E+00	1,08E+01	7,00E+00	-	-	-
Schlamm ⁶⁾	-4,08E+00	1,12E+00	2,27E+00	5,00E+00	-	-	-
Em. in Luft	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg
C ₂ F ₆	-	-	-	0,00E+00	-	-	-
CF ₄	-	-	-	0,00E+00	-	-	-
CH ₄	2,69E-01	8,08E-02	9,61E-02	4,73E+00	5,54E-03	4,52E-03	5,73E-03
CO	5,91E-02	1,65E-02	2,57E-02	4,99E+00	1,36E-03	1,09E-03	1,37E-03
CO ₂	1,33E+02	1,69E+01	4,22E+01	5,32E+00	8,88E+00	7,14E+00	9,08E+00
HCl	2,09E-02	1,08E-02	1,22E-02	5,57E+00	1,39E-03	1,15E-03	1,51E-03
HF	1,20E-03	4,54E-04	8,12E-04	6,21E+00	1,46E-04	1,25E-04	1,79E-04
N ₂ O	1,53E-03	4,08E-04	8,28E-04	5,20E+00	8,93E-05	7,23E-05	9,79E-05
NH ₃	1,45E-04	3,04E-05	6,40E-05	6,81E+00	2,66E-05	2,22E-05	3,02E-05
NM ₂ OC	6,65E-02	3,48E-02	8,92E-02	5,45E+00	5,57E-03	4,83E-03	5,79E-03
NO _x	2,38E-01	6,25E-02	1,25E-01	5,40E+00	1,75E-02	1,41E-02	1,82E-02
SO ₂	5,71E-01	2,83E-01	5,24E-01	5,71E+00	4,76E-02	3,84E-02	5,34E-02
Staub	9,35E-02	3,51E-02	6,01E-02	5,90E+00	9,67E-03	7,59E-03	1,02E-02

¹⁰⁾ Einzelprozesse "Strangguß", "Warmwalzen" und "Kaltwalzen" bereits eingetafelt.

Tabelle E.22: Gesamtbilanz aufgeschlüsselt nach Einzelprozessen der Herstellung und Entsorgung einer Stahlrohkarosserie eines Mittelklasse-Pkw, für das Szenario „günstig“. Angegeben sind Mittelwert $\langle x \rangle$, Standardabweichung des Mittelwertes m , Standardabweichung s sowie bei Teilprozeßketten der mittlere Stichprobenumfang $\langle n \rangle$. (Teil 7)

	Elektrostahlerzeugung			Elektrodenherstellung			Transport ¹⁾		
	$\langle x \rangle$	m	s	$\langle x \rangle$	m	s	$\langle x \rangle$	m	s
Prozeßwichtung	3,53E+02	1,17E+02	1,20E+02	9,53E-01	3,33E-01	3,53E-01			
Energieträger	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ
Steinkohle	2,03E+03	7,31E+02	7,53E+02	2,49E+00	1,23E+00	1,23E+00	6,00E+00	4,36E+00	4,85E+00
Braunkohle	1,80E+02	6,41E+01	7,97E+01	1,55E-01	9,56E-02	9,81E-02	2,02E+00	1,37E+00	1,54E+00
Erdgas	1,18E+02	4,09E+01	4,80E+01	4,12E+00	2,38E+00	2,36E+00	1,31E+00	8,88E-01	9,75E-01
Öl	3,28E+02	1,06E+02	1,15E+02	1,99E-01	1,22E-01	1,21E-01	3,67E+02	1,99E+02	2,03E+02
Elektr. aus Uran ¹⁾	8,81E+02	3,04E+02	3,47E+02	7,58E-01	4,62E-01	4,55E-01	9,85E+00	6,64E+00	7,22E+00
Pot. En. Wasser	1,37E+02	4,74E+01	5,42E+01	1,18E-01	7,20E-02	7,08E-02	1,53E+00	1,03E+00	1,12E+00
Gichtgas	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Koksgas	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Konvertergas	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Materialbedarf	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg
Bauxit ¹⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bentonit ¹⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Brannkalk	1,06E+01	6,35E+00	6,16E+00	-	-	-	-	-	-
Eisenerz	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sinter	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Pellets	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Elektrode	9,53E-01	3,33E-01	3,53E-01	-9,53E-01	3,33E-01	3,53E-01	-	-	-
H ₂ SO ₄ ¹⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kalkstein	6,01E-01	3,60E-01	3,49E-01	-	-	-	-	-	-
Karosserie ²⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Legierungen ¹⁾	4,17E+00	2,50E+00	2,42E+00	-	-	-	-	-	-
Pech ¹⁾	-	-	-	1,91E-01	1,16E-01	1,14E-01	-	-	-
Petrolkoks ¹⁾	-	-	-	7,62E-01	4,65E-01	4,58E-01	-	-	-
Roheisen	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Roherz	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Rohstahl	-3,53E+02	1,17E+02	1,20E+02	-	-	-	-	-	-
Sauerstoff ¹⁾	4,54E+01	2,23E+01	3,10E+01	-	-	-	-	-	-
Schlacke u.ä. ¹⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Schrott	3,86E+02	1,28E+02	1,31E+02	-	-	-	-	-	-
Shredderschrott	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Stahlblech	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Stahlbl. gepr. ¹⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Vorbrammen	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Walzöl ¹⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Warmband	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Zuschläge ¹⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ausbruch	-8,33E+00	5,00E+00	4,84E+00	-	-	-	-	-	-
Auswurf	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Rohbenzol	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Rohteer	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Schlacke	-1,87E+01	6,82E+00	8,32E+00	-	-	-	-	-	-
Stäube	-8,10E+00	3,86E+00	5,30E+00	-	-	-	-	-	-
Walzzunder	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Schlamm ¹⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Em. in Luft	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg
C ₂ F ₆	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CF ₄	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CH ₄	4,82E-01	1,67E-01	2,05E-01	9,78E-04	6,19E-04	7,37E-04	2,71E-03	1,57E-03	1,67E-03
CO	1,85E+00	1,33E+00	2,03E+00	1,52E-04	1,12E-04	1,08E-04	2,62E-02	1,84E-02	1,89E-02
CO ₂	1,88E+02	6,29E+01	6,63E+01	4,21E-01	2,23E-01	2,22E-01	2,77E+01	2,03E+01	2,08E+01
HCl	6,16E-02	3,18E-02	3,14E-02	1,73E-05	9,48E-06	1,04E-05	1,46E-04	1,00E-04	1,18E-04
HF	3,17E-03	1,42E-03	1,63E-03	1,84E-06	1,05E-06	1,38E-06	1,55E-05	1,10E-05	1,51E-05
N ₂ O	2,06E-03	9,14E-04	9,78E-04	4,40E-06	2,94E-06	2,90E-06	2,45E-05	1,34E-05	1,92E-05
NH ₃	3,07E-04	1,17E-04	1,60E-04	3,41E-07	1,88E-07	2,19E-07	2,81E-06	1,96E-06	2,42E-06
NM ₂ OC	8,91E-02	3,90E-02	3,96E-02	3,11E-04	2,15E-04	2,09E-04	1,93E-02	1,33E-02	1,35E-02
NO _x	4,51E-01	1,55E-01	1,86E-01	4,76E-04	2,53E-04	2,56E-04	1,52E-01	1,10E-01	1,15E-01
SO ₂	1,02E+00	3,57E-01	4,38E-01	1,64E-03	9,28E-04	9,52E-04	6,50E-02	4,91E-02	8,43E-02
Staub	2,60E-01	1,04E-01	1,14E-01	1,87E-04	1,02E-04	1,08E-04	1,18E-02	7,94E-03	8,35E-03

¹⁾ Wichtung über Produkt aus Transportentfernung (siehe Abschnitt 4.2.6) und gewichteter Bedarf im Zielprozeß.

Aluminiumrohkarosserie im Szenario „günstig“

Tabelle E.23: Gesamtbilanz aufgeschlüsselt nach Einzelprozessen der Herstellung und Entsorgung einer Aluminiumrohkarosserie eines Mittelklasse-Pkw, für das Szenario „Basis“. Angegeben sind Mittelwert $\langle x \rangle$, Standardabweichung des Mittelwertes m , Standardabweichung s sowie bei Teilprozessketten der mittlere Stichprobenumfang $\langle n \rangle$. (Teil 1)

Prozesskategorie				Bauxitabbau ¹⁾			Bayer-Prozess ¹⁾		
	$\langle x \rangle$	m	s	$\langle x \rangle$	m	s	$\langle x \rangle$	m	s
Prozesskategorie	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ
Energieträger									
Steinkohle	6,29E+03	2,00E+03	3,83E+03	1,61E+00	1,20E+00	1,88E+00	2,99E+02	1,92E+02	3,83E+02
Braunkohle	1,11E+03	2,12E+02	4,47E+02	-	-	-	5,56E+01	3,08E+01	6,34E+01
Erdgas	5,29E+03	7,53E+02	1,09E+03	-	-	-	3,28E+02	1,98E+02	4,04E+02
Öl	5,66E+03	1,18E+03	1,65E+03	2,16E+02	1,29E+02	2,07E+02	1,29E+03	6,53E+02	1,33E+03
En _{prim} aus Uran ¹⁾	5,38E+03	9,92E+02	2,07E+03	-	-	-	2,71E+02	1,48E+02	3,04E+02
Pot. En. Wasser	3,05E+03	1,21E+03	2,52E+03	-	-	-	4,22E+01	2,31E+01	4,73E+01
Materialbedarf	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg
Abbrand	-1,19E+01	4,25E+00	9,41E+00	-	-	-	-	-	-
AlF ₃	0,00E+00	1,22E+00	2,50E+00	-	-	-	-	-	-
Alu. primär	0,00E+00	4,70E+01	9,69E+01	-	-	-	-	-	-
Alu. sekundär	0,00E+00	6,22E+01	7,44E+01	-	-	-	-	-	-
Al. Walzbarren	0,00E+00	4,57E+01	7,92E+01	-	-	-	-	-	-
Walzb. hom. ²⁾	0,00E+00	4,57E+01	7,92E+01	-	-	-	-	-	-
Alu.-Blech	0,00E+00	4,93E+00	9,08E+00	-	-	-	-	-	-
Blech gepreßt	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-	-	-	-	-	-
Anode ²⁾	0,00E+00	2,18E+01	4,53E+01	-	-	-	-	-	-
Bauxit	0,00E+00	1,93E+02	2,86E+02	-2,83E+02	1,37E+02	2,83E+02	2,80E+02	1,37E+02	2,83E+02
Brantkalk	0,00E+00	4,98E+00	1,02E+01	-	-	-	7,04E+00	3,52E+00	7,21E+00
H ₂ SiF ₆ ²⁾	1,28E+00	9,47E-01	1,57E+00	-	-	-	-	-	-
Kalkstein	1,54E+01	6,92E+00	1,42E+01	-	-	-	-	-	-
Kaltband Al.	0,00E+00	4,04E+01	7,00E+01	-	-	-	-	-	-
Kar. Alu. ²⁾	0,00E+00	1,42E+02	1,72E+02	-	-	-	-	-	-
Kar. ungeh. ²⁾	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-	-	-	-	-	-
Kieselsäure	-8,56E-01	6,31E-01	1,04E+00	-	-	-	-	-	-
Krätze ²⁾	1,65E+01	8,25E+00	8,25E+00	-	-	-	-	-	-
Legierungen ²⁾	1,02E+01	5,08E+00	5,08E+00	-	-	-	-	-	-
NaOH	0,00E+00	1,33E+01	2,81E+01	-	-	-	1,81E+01	9,39E+00	1,99E+01
Pech ²⁾	7,24E+00	3,72E+00	7,71E+00	-	-	-	-	-	-
Petrolkoks ²⁾	2,43E+01	1,19E+01	2,48E+01	-	-	-	-	-	-
Rohförderung	5,51E+02	3,04E+02	8,15E+02	5,51E+02	3,04E+02	8,15E+02	-	-	-
Sand ²⁾	1,83E-03	1,31E-03	2,19E-03	-	-	-	-	-	-
Schmelzsalz ²⁾	3,23E+00	1,62E+00	1,62E+00	-	-	-	-	-	-
Schrott neu	0,00E+00	4,05E+01	7,02E+01	-	-	-	-	-	-
Shredderschrott	0,00E+00	1,21E+02	1,36E+02	-	-	-	-	-	-
Steinsalz	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-	-	-	-	-	-
Tonerde	0,00E+00	6,34E+01	1,85E+02	-	-	-	-1,30E+02	6,34E+01	1,31E+02
Walzl ²⁾	1,39E+00	1,10E-01	1,80E-01	-	-	-	-	-	-
Warmband Al.	0,00E+00	4,04E+01	7,00E+01	-	-	-	-	-	-
Ausbruch	-3,08E-01	1,54E-01	1,54E-01	-	-	-	-	-	-
Cl ₂	-8,20E+00	4,22E+00	8,91E+00	-	-	-	-	-	-
H ₂	-2,32E-01	1,19E-01	2,52E-01	-	-	-	-	-	-
Stäube	-4,62E+00	2,31E+00	2,31E+00	-	-	-	-	-	-
Em. in Luft	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg
C ₂ F ₆	1,12E-02	5,79E-03	1,19E-02	-	-	-	-	-	-
CF ₄	4,48E-02	2,38E-02	6,28E-02	-	-	-	-	-	-
CH ₄	1,72E+00	2,90E-01	4,66E-01	1,32E-02	9,32E-03	1,50E-02	2,76E-01	1,46E-01	3,04E-01
CO	6,54E+00	3,10E+00	7,93E+00	3,67E-03	2,59E-03	4,15E-03	6,41E-02	3,92E-02	7,49E-02
CO ₂	1,37E+03	2,58E+02	4,95E+02	1,69E+01	1,16E+01	1,88E+01	1,32E+02	6,57E+01	1,36E+02
HCl	3,36E-01	1,02E-01	1,22E-01	2,89E-04	1,90E-04	3,19E-04	1,68E-02	1,31E-02	2,53E-02
HF	9,35E-02	5,26E-02	1,03E-02	8,51E-06	5,20E-06	9,55E-06	7,84E-04	5,30E-04	1,05E-03
N ₂ O	1,27E-02	2,42E-03	4,67E-03	2,25E-04	1,58E-04	2,54E-04	2,09E-03	1,28E-03	2,44E-03
NH ₃	3,84E-03	1,04E-03	1,77E-03	2,98E-06	1,86E-06	3,24E-06	8,13E-05	4,48E-05	9,28E-05
NM ₂ VOC	7,67E-01	2,68E-01	3,22E-01	2,32E-02	1,64E-02	2,63E-02	1,52E-01	1,15E-01	2,03E-01
NO _x	2,74E+00	5,68E-01	9,65E-01	4,29E-02	3,00E-02	3,00E-02	2,73E-01	1,46E-01	3,05E-01
SO ₂	6,47E+00	1,53E+00	2,83E+00	1,41E-01	9,95E-02	1,60E-01	1,05E+00	6,26E-01	1,36E+00
Staub	2,22E+00	8,40E-01	1,44E+00	1,09E-02	7,65E-03	1,23E-02	1,15E-01	7,03E-02	1,33E-01

²⁾ exclusive Bereitstellung

¹⁾ Auf Basis des thermischen Wirkungsgrades von Kernkraftwerken (siehe Abschnitt 4.2.5).

Tabelle E.24: Gesamtbilanz aufgeschlüsselt nach Einzelprozessen der Herstellung und Entsorgung einer Aluminiumrohkarosserie eines Mittelklasse-Pkw, für das Szenario „Basis“. Angegeben sind Mittelwert $\langle x \rangle$, Standardabweichung des Mittelwertes m , Standardabweichung s sowie bei Teilprozeßketten der mittlere Stichprobenumfang $\langle n \rangle$. (Teil 2)

	Natronlauge (mit Steinsalzabbau) ²⁾			Kalksteinabbau ³⁾			Kalk-Kalziniere ⁴⁾		
	$\langle x \rangle$	m	s	$\langle x \rangle$	m	s	$\langle x \rangle$	m	s
Prozeßwichtung	1,83E+01	9,39E+00	1,99E+01	1,38E+01	6,88E+00	1,41E+01	7,08E+00	3,52E+00	7,21E+00
Energieträger	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ
Steinkohle	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,28E-01	1,06E-01	1,76E-01	4,77E+01	2,59E+01	4,88E+01
Braunkohle	-	-	-	2,31E-02	2,59E-02	4,06E-02	3,26E-01	1,71E-01	3,44E-01
Erdgas	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	6,71E-02	6,11E-02	9,96E-02	8,38E+00	8,59E+00	1,35E+01
Öl	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,15E+00	7,92E-01	1,38E+00	1,39E+00	8,00E-01	1,33E+00
E _{pot} aus Uran ¹⁾	-	-	-	1,13E-01	1,26E-01	1,97E-01	1,59E+00	8,23E-01	1,64E+00
Pot. En. Wasser	-	-	-	1,76E-02	1,96E-02	3,06E-02	2,34E-01	1,27E-01	2,54E-01
Materialbedarf	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg
Abbrand	-	-	-	-	-	-	-	-	-
AlF ₃	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alu. primär	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alu. sekundär	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Al. Walzbarren	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Walzb. hom. ²⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alu.-Blech	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Blech gepreßt	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Anode ²⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bauxit	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Brannkalk	-	-	-	-	-	-	-7,08E+00	3,52E+00	7,21E+00
H ₂ SiF ₆ ¹⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kalkstein	9,59E-02	6,88E-02	1,15E-01	1,52E+00	7,56E-01	1,55E+00	1,38E+01	6,88E+00	1,41E+01
Kaltband Al.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kar. Alu. ⁴⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kar. ungeh. ⁵⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kieselsäure	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kräutze ⁴⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Legierungen ⁴⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NaOH	-1,83E+01	9,39E+00	1,99E+01	-	-	-	-	-	-
Pech ²⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Petrolkoks ²⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Roherz	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sand ¹⁾	1,83E-03	1,31E-03	2,19E-03	-	-	-	-	-	-
Schmelzsatz	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Schrott neu	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Shredderschrott	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Steinsalz	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-	-	-	-	-	-
Tonerde	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Walzöl ²⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Warmband Al.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ausbruch	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cl ₂	-8,20E+00	4,22E+00	8,91E+00	-	-	-	-	-	-
H ₂	-2,32E-01	1,19E-01	2,52E-01	-	-	-	-	-	-
Stäube	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Em. in Luft	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg
C ₂ F ₆	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CF ₄	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CH ₄	0,00E+00	0,00E+00	-	1,37E-04	7,66E-05	1,46E-04	1,34E-02	7,09E-03	1,45E-02
CO	0,00E+00	0,00E+00	-	3,62E-05	2,45E-05	4,13E-05	3,46E-03	2,46E-03	4,00E-03
CO ₂	0,00E+00	0,00E+00	-	1,05E-01	5,95E-02	1,14E-01	9,27E+00	4,63E+00	9,46E+00
HCl	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	4,03E-06	4,17E-06	6,54E-06	1,53E-03	1,16E-03	1,84E-03
HF	0,00E+00	0,00E+00	-	2,87E-07	2,79E-07	4,57E-07	5,81E-05	4,33E-05	6,94E-05
N ₂ O	0,00E+00	0,00E+00	-	1,11E-06	7,60E-07	1,28E-06	4,34E-05	2,85E-05	4,82E-05
NH ₃	0,00E+00	0,00E+00	-	4,50E-08	3,82E-08	6,43E-08	2,25E-06	1,51E-06	2,58E-06
NM VOC	0,00E+00	0,00E+00	-	2,07E-04	1,75E-04	2,72E-04	7,15E-04	5,46E-04	1,08E-03
NO _x	0,00E+00	0,00E+00	-	1,64E-04	8,93E-05	1,75E-04	8,07E-03	4,46E-03	9,03E-03
SO ₂	0,00E+00	0,00E+00	-	2,38E-04	1,28E-04	2,57E-04	1,80E-02	1,00E-02	1,96E-02
Staub	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	5,87E-01	5,01E-01	8,30E-01	1,31E-01	9,12E-02	1,48E-01

²⁾ Aluminiumwalzbarren homogenisiert³⁾ Nettoverbrauch⁴⁾ Aluminiumrohkarosserie⁵⁾ Aluminiumrohkarosserie ungehärtet

Tabelle E.25: Gesamtbilanz aufgeschlüsselt nach Einzelprozessen der Herstellung und Entsorgung einer Aluminiumrohkarosserie eines Mittelklasse-Pkw, für das Szenario „Basis“. Angegeben sind Mittelwert $\langle x \rangle$, Standardabweichung des Mittelwertes m , Standardabweichung s sowie bei Teilprozessketten der mittlere Stichprobenumfang $\langle n \rangle$. (Teil 3)

	Elektrolyse ⁹⁾			Aluminiumfluoridherstellung ⁹⁾			Anodenherstellung für Al-Elektrolyse ⁹⁾		
	$\langle x \rangle$	m	s	$\langle x \rangle$	m	s	$\langle x \rangle$	m	s
Prozeßwichtung	6,82E+01	3,32E+01	6,85E+01	1,59E+00	8,62E-01	1,77E+00	3,16E+01	1,54E+01	3,20E+01
Energieträger	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ
Steinkohle	3,71E+03	1,97E+03	3,74E+03	8,45E+01	4,14E+01	4,97E+01	1,56E+02	1,05E+02	1,94E+02
Braunkohle	3,77E+02	1,86E+02	3,88E+02	7,97E-01	8,13E-01	1,18E+00	6,28E+00	3,92E+00	7,89E+00
Erdgas	3,45E+02	0,00E+00	0,00E+00	5,20E-01	5,29E-01	7,62E-01	1,87E+02	1,22E+02	2,38E+02
Öl	1,48E+03	8,20E+02	7,21E+02	3,49E+01	1,53E+01	1,91E+01	9,50E+00	5,12E+00	1,02E+01
E _{Prim} aus Uran ¹⁾	1,78E+03	8,67E+02	1,80E+03	1,30E+00	1,48E+00	2,34E+00	3,62E+01	1,95E+01	3,85E+01
Pot. En. Wasser	2,49E+03	1,22E+03	2,52E+03	2,02E-01	2,30E-01	3,64E-01	5,62E+00	3,03E+00	5,99E+00
Materialbedarf	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg
Abbrand	-	-	-	-	-	-	-	-	-
AlF ₃	1,59E+00	8,62E-01	1,77E+00	-1,59E+00	8,62E-01	1,77E+00	-	-	-
Alu. primär	-6,82E+01	3,32E+01	6,85E+01	-	-	-	-	-	-
Alu. sekundär	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Al. Walzbarren	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Walzb. hom. ²⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alu.-Blech	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Blech gepreßt	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Anode ³⁾	3,16E+01	1,54E+01	3,20E+01	-	-	-	-3,16E+01	1,54E+01	3,20E+01
Bauxit	-	-	-	2,43E+00	1,79E+00	2,96E+00	-	-	-
Brannkalk	-	-	-	4,42E-02	3,26E-02	5,39E-02	-	-	-
H ₂ SiF ₆ ⁴⁾	-	-	-	1,28E+00	9,47E-01	1,57E+00	-	-	-
Kalkstein	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kaltband AL	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kar. Alu. ⁴⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kar. ungeh. ⁵⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kieselsäure	-	-	-	-8,56E-01	6,31E-01	1,04E+00	-	-	-
Kräuze ⁶⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Legierungen ⁷⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NaOH	-	-	-	2,12E-01	1,56E-01	2,58E-01	-	-	-
Pech ⁷⁾	-	-	-	-	-	-	7,24E+00	3,72E+00	7,71E+00
Petrolkoks ⁷⁾	-	-	-	-	-	-	2,43E+01	1,19E+01	2,48E+01
Roherz	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sand ⁷⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Schmelzsatz	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Schrott neu	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Shredderschrott	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Steinsalz	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Tonerde	1,30E+02	6,34E+01	1,31E+02	-	-	-	-	-	-
Walzöl ¹⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Warmband AL	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ausbruch	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cl ₂	-	-	-	-	-	-	-	-	-
H ₂	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Stäube	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Em. in Luft	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg
C ₂ F ₆	1,12E-02	5,79E-03	1,19E-02	-	-	-	-	-	-
CF ₄	4,92E-02	3,02E-02	6,20E-02	-	-	-	-	-	-
CH ₄	1,53E-01	7,97E-02	1,60E-01	1,52E-02	1,05E-02	1,85E-02	3,32E-02	2,08E-02	4,05E-02
CO	6,62E+00	3,71E+00	7,86E+00	4,11E-03	3,29E-03	5,18E-03	5,14E-03	3,78E-03	6,14E-03
CO ₂	4,54E+02	2,22E+02	4,58E+02	5,38E+00	3,44E+00	6,26E+00	3,44E+01	2,24E+01	3,81E+01
HCl	7,09E-02	3,54E-02	7,49E-02	1,67E-03	1,43E-03	2,17E-03	5,30E-04	2,90E-04	5,82E-04
HF	8,74E-02	5,59E-02	9,71E-02	3,82E-04	2,64E-04	4,56E-04	5,62E-05	3,21E-05	6,71E-05
N ₂ O	3,57E-03	1,81E-03	3,66E-03	8,41E-05	6,10E-05	1,04E-04	1,47E-04	1,01E-04	1,70E-04
NH ₃	1,37E-03	7,17E-04	1,57E-03	3,29E-06	2,38E-06	4,11E-06	1,04E-05	5,82E-06	1,18E-05
NM ₂ OC	1,73E-01	1,00E-01	1,83E-01	5,09E-03	4,29E-03	6,55E-03	3,64E-03	8,09E-03	1,75E-02
NO _x	7,94E-01	4,06E-01	8,43E-01	1,33E-02	8,63E-03	1,59E-02	3,06E-02	1,90E-02	3,34E-02
SO ₂	2,11E+00	1,09E+00	2,32E+00	4,64E-02	3,06E-02	5,69E-02	3,68E-02	2,23E-02	4,16E-02
Staub	7,83E-01	4,38E-01	8,45E-01	2,17E-02	1,45E-02	2,56E-02	1,51E-02	9,97E-03	1,68E-02

⁹⁾ Ohne Aluminiumanteil.

⁷⁾ Von Bereitstellung nur Energiebedarf erfaßt.

¹⁾ Über Teilprozeßkette "Tonerde" miterfaßt.

Tabelle E.26: Gesamtbilanz aufgeschlüsselt nach Einzelprozessen der Herstellung und Entsorgung einer Aluminiumrohkarosserie eines Mittelklasse-Pkw, für das Szenario „Basis“. Angegeben sind Mittelwert $\langle x \rangle$, Standardabweichung des Mittelwertes m , Standardabweichung s sowie bei Teilprozesseketten der mittlere Stichprobenumfang $\langle n \rangle$. (Teil 4)

	Walzbarrenherstellung			Homogenisieren			Warmwalzen von Aluminium		
	$\langle x \rangle$	m	s	$\langle x \rangle$	m	s	$\langle x \rangle$	m	s
Prozesswichtung	3,95E+02	3,23E+01	5,60E+01	3,95E+02	3,23E+01	5,60E+01	3,50E+02	2,85E+01	4,95E+01
Energieträger	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ
Steinkohle	7,58E+01	2,21E+01	3,04E+01	5,78E+01	1,65E+01	2,14E+01	1,54E+02	4,84E+01	6,38E+01
Braunkohle	2,55E+01	3,46E+00	7,65E+00	1,94E+01	2,36E+00	4,98E+00	5,17E+01	9,29E+00	1,64E+01
Erdgas	1,03E+03	2,26E+02	5,33E+02	7,23E+02	3,40E+02	3,53E+02	3,37E+01	5,55E+00	8,83E+00
Öl	3,27E+01	3,56E+00	7,61E+00	2,49E+01	2,26E+00	4,29E+00	6,64E+01	1,06E+01	1,69E+01
E _{Prim} aus Uran ¹⁾	1,24E+02	1,31E+01	2,67E+01	9,49E+01	8,19E+00	1,39E+01	2,53E+02	3,99E+01	6,00E+01
Pot. En. Wasser	1,94E+01	2,11E+00	4,19E+00	1,48E+01	1,34E+00	2,21E+00	3,93E+01	6,31E+00	9,41E+00
Materialbedarf	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg
Abbrand	-1,19E+01	4,25E+00	9,41E+00	-	-	-	-	-	-
AlF ₃	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alu. primär	6,82E+01	3,32E+01	6,85E+01	-	-	-	-	-	-
Alu. sekundär	3,39E+02	5,59E+01	4,71E+01	-	-	-	-	-	-
Al. Walzbarren	-3,95E+02	3,23E+01	5,60E+01	3,95E+02	3,23E+01	5,60E+01	-	-	-
Walzb. hom. ²⁾	-	-	-	-3,95E+02	3,23E+01	5,60E+01	3,95E+02	3,23E+01	5,60E+01
Alu.-Blech	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Blech gepreßt	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Anode ³⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bauxit	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Brannkalk	-	-	-	-	-	-	-	-	-
H ₂ SiF ₆ ⁴⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kalkstein	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kaltband Al.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kar. Alu. ⁵⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kar. ungeh. ⁵⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kieselsäure	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kräutze ⁶⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Legierungen ⁷⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NaOH	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Pech ⁸⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Petrolkoks ⁹⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Rohrz	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sand ⁷⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Schmelzsatz	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Schrott neu	-	-	-	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-4,45E+01	4,93E+00	7,86E+00
Shredderschrott	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Steinsalz	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Tonerde	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Walzöl ¹⁾	-	-	-	-	-	-	6,22E-01	7,92E-02	1,23E-01
Warmband Al.	-	-	-	-	-	-	-3,50E+02	2,85E+01	4,95E+01
Ausbruch	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cl ₂	-	-	-	-	-	-	-	-	-
H ₂	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Stäube	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Em. in Luft	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg
C ₂ F ₆	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CF ₄	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CH ₄	1,79E-01	5,87E-02	1,33E-01	1,26E-01	6,83E-02	1,06E-01	1,40E-02	3,96E-03	5,55E-03
CO	2,75E-02	1,43E-02	1,92E-02	3,19E-02	1,55E-02	1,60E-02	3,42E-03	8,08E-04	1,13E-03
CO ₂	7,25E+01	1,43E+01	3,34E+01	5,16E+01	2,18E+01	2,26E+01	2,34E+01	3,72E+00	5,71E+00
HCl	2,20E-02	1,00E-02	1,04E-02	1,89E-03	3,38E-04	5,89E-04	3,75E-03	7,54E-04	1,52E-03
HF	2,39E-04	5,47E-05	1,35E-04	2,00E-04	4,57E-05	1,03E-04	3,98E-04	1,10E-04	2,71E-04
N ₂ O	7,63E-04	3,61E-04	4,87E-04	8,57E-04	3,93E-04	4,07E-04	2,26E-04	5,93E-05	1,25E-04
NI ₃	4,48E-05	8,92E-06	1,88E-05	3,79E-05	7,92E-06	1,45E-05	7,21E-05	1,71E-05	3,70E-05
NM ₂ VOC	1,56E-02	4,30E-02	9,34E-02	1,57E-02	5,95E-03	6,23E-03	1,34E-02	6,52E-03	6,95E-03
NO _x	7,69E-02	2,24E-02	3,53E-02	5,53E-02	2,35E-02	2,46E-02	4,57E-02	8,33E-03	1,58E-02
SO ₂	9,62E-02	2,14E-02	4,33E-02	7,10E-02	1,99E-02	3,24E-02	1,19E-01	3,30E-02	7,56E-02
Staub	2,87E-02	9,65E-03	1,37E-02	2,90E-02	1,04E-02	1,16E-02	2,37E-02	5,38E-03	1,21E-02

²⁾ Über Teilprozessekette "Primäraluminiumherstellung" miterfaßt.

Tabelle E.27: Gesamtbilanz aufgeschlüsselt nach Einzelprozessen der Herstellung und Entsorgung einer Aluminiumrohkarosserie eines Mittelklasse-Pkw, für das Szenario „Basis“. Angegeben sind Mittelwert $\langle x \rangle$, Standardabweichung des Mittelwertes m , Standardabweichung s sowie bei Teilprozeßketten der mittlere Stichprobenumfang $\langle n \rangle$. (Teil 5)

	Kaltwalzen, Zwischenglühen			Besäumen von Aluminium-Kaltband			Pressen von Aluminiumblech		
	$\langle x \rangle$	m	s	$\langle x \rangle$	m	s	$\langle x \rangle$	m	s
Prozeßwichtung	3,50E+02	2,85E+01	4,95E+01	2,89E+02	3,49E+00	6,42E+00	2,02E+02	0,00E+00	0,00E+00
Energieträger	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ
Steinkohle	2,18E+02	8,07E+01	1,20E+02	4,39E+01	3,16E+01	5,28E+01	2,57E+02	1,25E+02	2,00E+02
Braunkohle	7,33E+01	1,95E+01	3,54E+01	1,48E+01	9,91E+00	1,73E+01	8,63E+01	3,56E+01	6,31E+01
Erdgas	2,13E+02	7,95E+01	8,56E+01	6,84E+01	5,55E+01	7,89E+01	5,62E+01	2,29E+01	3,98E+01
Öl	9,41E+01	2,38E+01	4,18E+01	1,89E+01	1,26E+01	2,19E+01	1,19E+02	4,49E+01	7,82E+01
Ep _{dis} aus Uran ¹⁾	3,58E+02	9,00E+01	1,56E+02	7,20E+01	4,80E+01	8,31E+01	4,21E+02	1,70E+02	2,95E+02
Pot. En. Wasser	5,57E+01	1,41E+01	2,43E+01	1,12E+01	7,47E+00	1,29E+01	6,55E+01	2,65E+01	4,59E+01
Materialbedarf	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg
Abbrand	-	-	-	-	-	-	-	-	-
AlF ₃	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alu. primär	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alu. sekundär	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Al. Walzbarren	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Walzb. hom. ²⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alu.-Blech	-	-	-	-2,89E+02	3,49E+00	6,42E+00	2,89E+02	3,49E+00	6,42E+00
Blech gepreßt	-	-	-	-	-	-	-2,02E+02	0,00E+00	0,00E+00
Anode ³⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bauxit	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Brannkalk	-	-	-	-	-	-	-	-	-
H ₂ SiF ₆ ⁴⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kalkstein	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kaltband Al.	-3,50E+02	2,85E+01	4,95E+01	3,50E+02	2,85E+01	4,95E+01	-	-	-
Kar. Alu. ⁴⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kar. ungeh. ⁵⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kieselsäure	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Krätze ⁶⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Legierungen ⁷⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NaOH	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Pech ⁷⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Petrolkoks ⁷⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Roherz	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sand ⁷⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Schmelzsatz	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Schrott neu	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-6,10E+01	2,82E+01	4,89E+01	-8,79E+01	3,49E+00	6,42E+00
Shredderschrott	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Steinsalz	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Tonerde	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Walzöl ⁷⁾	7,69E-01	7,58E-02	1,31E-01	-	-	-	-	-	-
Warmband Al.	3,50E+02	2,85E+01	4,95E+01	-	-	-	-	-	-
Ausbruch	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cl ₂	-	-	-	-	-	-	-	-	-
H ₂	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Stäube	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Em. in Luft	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg
C ₂ F ₆	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CF ₄	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CH ₄	4,83E-02	1,74E-02	1,30E-02	1,52E-02	1,44E-02	2,08E-02	2,34E-02	1,09E-02	1,80E-02
CO	6,82E-03	1,81E-03	2,67E-03	2,76E-03	2,63E-03	3,64E-03	5,70E-03	2,51E-03	4,19E-03
CO ₂	4,41E+01	1,00E+01	1,60E+01	1,22E+01	1,04E+01	1,48E+01	3,90E+01	1,58E+01	2,74E+01
HCl	5,52E-03	1,53E-03	2,98E-03	1,41E-03	1,14E-03	1,66E-03	6,26E-03	2,64E-03	4,84E-03
HF	5,86E-04	1,97E-04	4,49E-04	1,50E-04	1,24E-04	1,94E-04	6,64E-04	3,08E-04	6,29E-04
N ₂ O	3,76E-04	1,10E-04	2,20E-04	1,21E-04	1,08E-04	1,55E-04	3,77E-04	1,72E-04	3,24E-04
NH ₃	1,06E-04	3,22E-05	6,60E-05	2,72E-05	2,23E-05	3,31E-05	1,20E-04	5,30E-05	1,00E-04
NM VOC	2,02E-02	1,03E-02	1,24E-02	5,46E-03	5,59E-03	8,62E-03	2,23E-02	1,37E-02	1,87E-02
NO _x	7,07E-02	1,78E-02	3,33E-02	2,00E-02	1,67E-02	2,39E-02	7,62E-02	3,15E-02	5,67E-02
SO ₂	1,76E-01	5,85E-02	1,27E-01	4,61E-02	3,85E-02	5,86E-02	1,98E-01	9,19E-02	1,81E-01
Staub	3,59E-02	1,03E-02	2,17E-02	9,75E-03	8,12E-03	1,20E-02	3,96E-02	1,72E-02	3,30E-02

Tabelle E.28: Gesamtbilanz aufgeschlüsselt nach Einzelprozessen der Herstellung und Entsorgung einer Aluminiumrohkarosserie eines Mittelklasse-Pkw, für das Szenario „Basis“. Angegeben sind Mittelwert $\langle x \rangle$, Standardabweichung des Mittelwertes m , Standardabweichung s sowie bei Teilprozessketten der mittlere Stichprobenumfang $\langle n \rangle$. (Teil 6)

	Fügen einer AluKarosserie			Aushaerten			Neuschrottaufbereitung		
	$\langle x \rangle$	m	s	$\langle x \rangle$	m	s	$\langle x \rangle$	m	s
Prozeßwichtung	2,02E+02	0,00E+00	0,00E+00	2,02E+02	0,00E+00	0,00E+00	1,93E+02	2,84E+01	4,93E+01
Energieträger	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ
Steinkohle	7,92E+02	3,05E+02	5,95E+02	-	-	-	1,64E+02	1,13E+02	1,59E+02
Braunkohle	2,66E+02	7,63E+01	1,87E+02	-	-	-	5,50E+01	3,52E+01	5,13E+01
Erdgas	1,74E+02	4,82E+01	1,18E+02	9,00E+02	4,23E+02	4,27E+02	7,59E+02	2,98E+02	4,38E+02
Öl	7,68E+02	9,40E+01	2,31E+02	-	-	-	5,09E+02	4,48E+01	6,44E+01
E _{Prim} aus Uran ¹⁾	1,30E+03	3,56E+02	8,71E+02	-	-	-	2,69E+02	1,70E+02	2,44E+02
Pot. En. Wasser	2,02E+02	5,56E+01	1,36E+02	-	-	-	4,18E+01	2,65E+01	3,80E+01
Materialbedarf	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg
Abbrand	-	-	-	-	-	-	-	-	-
AlF ₃	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alu. primär	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alu. sekundär	-	-	-	-	-	-	-1,85E+02	2,72E+01	4,71E+01
AL Walzbarren	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Walzb. hom. ²⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alu.-Blech	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Blech gepreßt	2,02E+02	0,00E+00	0,00E+00	-	-	-	-	-	-
Anode ³⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bauxit	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Brannkalk	-	-	-	-	-	-	-	-	-
H ₂ SiF ₆ ⁴⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kalkstein	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kaltband AL	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kar. Alu. ⁵⁾	-	-	-	-2,02E+02	0,00E+00	0,00E+00	-	-	-
Kar. ungeh. ⁵⁾	-2,02E+02	0,00E+00	0,00E+00	2,02E+02	0,00E+00	0,00E+00	-	-	-
Kieselsäure	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Krätze ⁶⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Legierungen ⁷⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NaOH	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Pech ⁷⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Petrolkoks ⁷⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Rohrz	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sand ⁷⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Schmelzsatz	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Schrott neu	-	-	-	-	-	-	1,93E+02	2,84E+01	4,93E+01
Shredderschrott	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Steinsalz	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Tonerde	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Walzöl ⁸⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Warmband AL	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ausbruch	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cl ₂	-	-	-	-	-	-	-	-	-
II ₂	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Stäube	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Em. in Luft	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg
C ₂ F ₆	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CF ₄	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CH ₄	7,23E-02	2,60E-02	5,35E-02	1,53E-01	8,55E-02	1,13E-01	1,38E-01	5,48E-02	9,47E-02
CO	1,76E-02	5,72E-03	1,24E-02	2,30E-02	1,63E-02	1,63E-02	2,21E-02	1,11E-02	1,31E-02
CO ₂	1,20E+02	3,30E+01	8,09E+01	5,42E+01	2,71E+01	2,71E+01	6,84E+01	1,03E+01	1,78E+01
HCl	1,93E-02	5,80E-03	1,44E-02	3,62E-04	2,56E-04	2,56E-04	4,28E-03	2,48E-03	3,73E-03
HF	2,05E-03	7,30E-04	1,90E-03	3,81E-05	2,69E-05	2,69E-05	4,54E-04	2,75E-04	4,58E-04
N ₂ O	1,16E-03	4,01E-04	9,73E-04	5,80E-04	4,10E-04	4,10E-04	7,06E-04	2,63E-04	3,23E-04
NH ₃	3,71E-04	1,21E-04	3,00E-04	8,21E-06	5,80E-06	5,80E-06	8,32E-05	4,83E-05	7,51E-05
NM _{VOC}	6,88E-02	3,69E-02	5,60E-02	3,35E-02	2,37E-02	2,37E-02	2,06E-02	3,20E-02	6,77E-02
NO _x	2,35E-01	6,78E-02	1,68E-01	4,83E-02	2,90E-02	2,90E-02	8,74E-02	2,35E-02	3,49E-02
SO ₂	6,11E-01	2,18E-01	5,46E-01	3,35E-02	2,03E-02	2,03E-02	1,53E-01	7,68E-02	1,27E-01
Staub	1,22E-01	3,89E-02	9,87E-02	1,51E-02	1,07E-02	1,07E-02	3,73E-02	1,40E-02	2,20E-02

¹⁰⁾ Einzelprozesse "Bauxitabbau", "Bayer-Prozeß", "Natronlauge", "Kalksteinabbau" und "Kalk-Klazinieren" bereits eingefaltet.

Tabelle E.29: Gesamtbilanz aufgeschlüsselt nach Einzelprozessen der Herstellung und Entsorgung einer Aluminiumrohkarosserie eines Mittelklasse-Pkw, für das Szenario „Basis“. Angegeben sind Mittelwert $\langle x \rangle$, Standardabweichung des Mittelwertes m , Standardabweichung s sowie bei Teilprozessketten der mittlere Stichprobenumfang $\langle n \rangle$. (Teil 7)

	TPK Tonerdeherstellung ¹⁰⁾				TPK Primäraluminiumherstellung ¹¹⁾			
	$\langle x \rangle$	m	s	$\langle n \rangle$	$\langle x \rangle$	m	s	$\langle n \rangle$
Prozeßwirkung	1,30E+02	6,34E+01	1,31E+02	0,00E+00	6,82E+01	3,32E+01	6,85E+01	0,00E+00
Energieträger	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ
Steinkohle	3,48E+02	1,94E+02	3,86E+02	4,57E+00	3,94E+03	1,95E+03	3,75E+03	1,07E+02
Braunkohle	5,59E+01	3,08E+01	6,34E+01	4,99E+00	3,84E+02	1,85E+02	3,88E+02	1,12E+02
Erdgas	3,37E+02	1,98E+02	4,04E+02	4,93E+00	5,30E+02	2,06E+02	4,24E+02	7,49E+01
Öl	1,51E+03	6,65E+02	1,35E+03	4,42E+00	1,54E+03	8,19E+02	7,23E+02	5,20E+01
E _{prim} aus Uran ¹⁾	2,73E+02	1,48E+02	3,04E+02	4,99E+00	1,82E+03	8,59E+02	1,80E+03	1,12E+02
Pot. En. Wasser	4,25E+01	2,31E+01	4,73E+01	4,99E+00	2,50E+03	1,21E+03	2,52E+03	1,14E+02
Materialbedarf	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg
Abbrand	-	-	-	0,00E+00	-	-	-	0,00E+00
AlF ₃	-	-	-	0,00E+00	0,00E+00	1,22E+00	2,50E+00	2,50E+00
Alu. primär	-	-	-	0,00E+00	-6,82E+01	0,00E+00	6,85E+01	2,00E+00
Alu. sekundär	-	-	-	0,00E+00	-	-	-	0,00E+00
Al. Walzbarren	-	-	-	0,00E+00	-	-	-	0,00E+00
Walzb. hom. ²⁾	-	-	-	0,00E+00	-	-	-	0,00E+00
Alu.-Blech	-	-	-	0,00E+00	-	-	-	0,00E+00
Blech gepreßt	-	-	-	0,00E+00	-	-	-	0,00E+00
Anode ³⁾	-	-	-	0,00E+00	0,00E+00	2,18E+01	4,53E+01	3,30E+01
Bauxit	2,80E+02	1,37E+02	2,83E+02	9,00E+00	2,43E+00	1,79E+00	2,96E+00	1,00E+00
Brantkalk	-4,42E-02	4,98E+00	1,02E+01	2,00E+00	4,42E-02	3,26E-02	5,39E-02	1,00E+00
H ₂ SiF ₆ ⁴⁾	-	-	-	0,00E+00	1,28E+00	9,47E-01	1,57E+00	1,00E+00
Kalkstein	1,54E+01	6,92E+00	1,42E+01	1,90E+00	-	-	-	0,00E+00
Kaliband Al.	-	-	-	0,00E+00	-	-	-	0,00E+00
Kar. Alu. ⁵⁾	-	-	-	0,00E+00	-	-	-	0,00E+00
Kar. ungeh. ⁵⁾	-	-	-	0,00E+00	-	-	-	0,00E+00
Kieselsäure	-	-	-	0,00E+00	-8,56E-01	6,31E-01	1,04E+00	1,00E+00
Kräuze ^{6,7)}	-	-	-	0,00E+00	-	-	-	0,00E+00
Legierungen ⁸⁾	-	-	-	0,00E+00	-	-	-	0,00E+00
NaOH	-2,12E-01	1,33E+01	2,81E+01	3,49E+00	2,12E-01	1,56E-01	2,58E-01	1,00E+00
Pech ⁹⁾	-	-	-	0,00E+00	7,24E+00	3,72E+00	7,71E+00	4,00E+00
Petrolkoks ⁹⁾	-	-	-	0,00E+00	2,43E+01	1,19E+01	2,48E+01	4,00E+00
Roherz	-	-	-	0,00E+00	-	-	-	0,00E+00
Sand ⁹⁾	1,83E-03	1,31E-03	2,19E-03	1,00E+00	-	-	-	0,00E+00
Schmelzsatz	-	-	-	0,00E+00	-	-	-	0,00E+00
Schrott neu	-	-	-	0,00E+00	-	-	-	0,00E+00
Shredderschrott	-	-	-	0,00E+00	-	-	-	0,00E+00
Steinsatz	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-	-	-	0,00E+00
Tonerde	-1,30E+02	0,00E+00	1,31E+02	2,00E+00	1,30E+02	6,34E+01	1,31E+02	5,00E+00
Walzöl ¹⁾	-	-	-	0,00E+00	-	-	-	0,00E+00
Warmband Al.	-	-	-	0,00E+00	-	-	-	0,00E+00
Ausbruch	-	-	-	0,00E+00	-	-	-	0,00E+00
Cl ₂	-8,20E+00	4,22E+00	8,91E+00	2,00E+00	-	-	-	0,00E+00
H ₂	-2,32E-01	1,19E-01	2,52E-01	2,00E+00	-	-	-	0,00E+00
Stäube	-	-	-	0,00E+00	-	-	-	0,00E+00
Em. in Luft	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg
C ₂ F ₆	-	-	-	0,00E+00	1,12E-02	5,79E-03	1,19E-02	3,00E+00
CF ₄	-	-	-	0,00E+00	4,48E-02	2,38E-02	6,28E-02	5,00E+00
CH ₄	2,83E-01	1,35E-01	3,08E-01	5,72E+00	2,04E-01	8,16E-02	1,67E-01	5,85E+01
CO	6,43E-02	2,21E-02	7,70E-02	5,68E+00	6,25E+00	3,10E+00	7,93E+00	6,44E+00
CO ₂	1,57E+02	1,05E+02	1,38E+02	5,47E+00	4,94E+02	2,20E+02	4,60E+02	8,50E+01
HCl	1,60E-02	5,69E-03	5,69E-03	5,70E+00	7,31E-02	3,52E-02	7,50E-02	1,10E+02
HF	7,54E-04	2,12E-04	1,07E-03	5,76E+00	8,28E-02	5,25E-02	9,72E-03	1,61E+01
N ₂ O	2,36E-03	1,29E-03	2,45E-03	4,62E+00	3,78E-03	1,79E-03	3,67E-03	6,78E+01
NH ₃	7,96E-05	3,24E-05	9,44E-05	5,80E+00	1,38E-03	7,10E-04	1,57E-03	1,12E+02
NM ₂ OC	2,04E-01	2,30E-01	2,15E-01	5,54E+00	1,86E-01	9,83E-02	1,85E-01	4,64E+01
NO _x	3,41E-01	2,91E-01	3,10E-01	5,39E+00	8,37E-01	4,01E-01	8,43E-01	8,13E+01
SO ₂	1,25E+00	9,82E-01	1,37E+00	5,56E+00	2,19E+00	1,08E+00	2,32E+00	6,82E+01
Staub	9,01E-01	7,19E-01	1,16E+00	3,25E+00	8,14E-01	4,30E-01	8,47E-01	5,36E+01

¹⁰⁾ Einzelprozesse "Elektrolyse", "Aluminiumfluoridherstellung" und "Anodenherstellung für Al-Elektrolyse" bereits eingefaltet.

Tabelle E.30: Gesamtbilanz aufgeschlüsselt nach Einzelprozessen der Herstellung und Entsorgung einer Aluminiumrohkarosserie eines Mittelklasse-Pkw, für das Szenario „Basis“. Angegeben sind Mittelwert $\langle x \rangle$, Standardabweichung des Mittelwertes m , Standardabweichung s sowie bei Teilprozessen der mittlere Stichprobenumfang $\langle n \rangle$. (Teil 8)

	Shredder			Transporte ¹²⁾			Sekundäraluminiumherzeugung		
	$\langle x \rangle$	m	s	$\langle x \rangle$	m	s	$\langle x \rangle$	m	s
Prozeßwichtung	2,64E+02	1,32E+02	1,63E+02				1,54E+02	6,56E-01	7,25E-01
Energieträger	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ
Stieinkohle	5,34E+01	4,62E+01	6,99E+01	5,21E+00	3,49E+00	3,67E+00	1,80E+02	1,03E+02	1,09E+02
Braunkohle	1,80E+01	1,48E+01	2,28E+01	1,75E+00	1,08E+00	1,14E+00	6,06E+01	3,08E+01	3,29E+01
Erdgas	1,17E+01	9,62E+00	1,47E+01	1,14E+00	7,01E-01	7,17E-01	4,59E+02	1,98E+02	2,00E+02
Öl	2,65E+01	2,01E+01	3,00E+01	6,51E+02	2,00E+02	2,69E+02	1,19E+03	4,80E+02	4,80E+02
E _{Prin} aus Uran ¹⁾	8,77E+01	7,19E+01	1,09E+02	8,55E+00	5,24E+00	5,29E+00	2,96E+02	1,48E+02	1,48E+02
Pot. En. Wasser	1,36E+01	1,12E+01	1,70E+01	1,33E+00	8,16E-01	8,23E-01	4,60E+01	2,31E+01	2,31E+01
Materialbedarf	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg
Abbrand	-	-	-	-	-	-	-	-	-
AlF ₃	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alu. primär	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alu. sekundär	-	-	-	-	-	-	-1,54E+02	6,56E-01	7,25E-01
Al. Walzbarren	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Walzb. hom. ²⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alu.-Blech	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Blech gepreßt	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Anode ³⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bauxit	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Brannkalk	-	-	-	-	-	-	-	-	-
H ₂ SiF ₆ ⁴⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kalkstein	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kaltband AL	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kar. Alu. ⁴⁾	2,02E+02	1,42E+02	1,72E+02	-	-	-	-	-	-
Kar. ungh. ⁵⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kieselsäure	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Krätze ⁶⁾	-	-	-	-	-	-	1,65E+01	8,25E+00	8,25E+00
Legierungen ⁷⁾	-	-	-	-	-	-	1,02E+01	5,08E+00	5,08E+00
NaOH	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Pech ⁷⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Petrolkoks ⁷⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Roherz	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sand ⁷⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Schmelzsatz	-	-	-	-	-	-	3,23E+00	1,62E+00	1,62E+00
Schrott neu	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Shredderschrott	-1,71E+02	8,56E+01	1,06E+02	-	-	-	1,71E+02	8,56E+01	8,56E+01
Steinsalz	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Tonerde	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Walzöl ⁹⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Warmband AL	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ausbruch	-	-	-	-	-	-	-3,08E-01	1,54E-01	1,54E-01
Cl ₂	-	-	-	-	-	-	-	-	-
H ₂	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Stäube	-	-	-	-	-	-	-4,62E+00	2,31E+00	2,31E+00
Em. in Luft	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg
C ₂ F ₆	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CF ₄	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CH ₄	5,23E-03	4,27E-03	6,45E-03	7,28E-02	2,48E-02	3,29E-02	3,83E-01	1,98E-01	1,98E-01
CO	1,28E-03	1,03E-03	1,54E-03	7,39E-02	2,71E-02	3,17E-02	1,05E-02	4,08E-03	4,12E-03
CO ₂	8,39E+00	6,74E+00	1,02E+01	1,01E+02	2,31E+01	3,19E+01	1,26E+02	5,46E+01	5,47E+01
HCl	1,31E-03	1,08E-03	1,70E-03	9,86E-04	5,96E-04	7,17E-04	1,80E-01	9,45E-02	9,45E-02
HF	1,38E-04	1,18E-04	2,01E-04	3,33E-05	1,32E-05	1,67E-05	4,93E-03	2,42E-03	2,43E-03
N ₂ O	8,44E-05	6,83E-05	1,10E-04	1,05E-03	4,92E-04	7,10E-04	2,65E-04	1,43E-04	1,87E-04
NH ₃	2,51E-05	2,10E-05	3,39E-05	1,14E-05	4,94E-06	6,12E-06	1,47E-03	7,47E-04	7,48E-04
NM VOC	5,26E-03	4,56E-03	6,51E-03	1,41E-01	6,11E-02	7,24E-02	1,57E-02	1,07E-02	1,07E-02
NO _x	1,66E-02	1,33E-02	2,05E-02	4,85E-01	2,06E-01	2,44E-01	3,46E-01	1,60E-01	1,60E-01
SO ₂	4,50E-02	3,63E-02	6,00E-02	1,14E+00	3,39E-01	5,82E-01	3,41E-01	1,33E-01	1,53E-01
Staub	9,13E-03	7,17E-03	1,14E-02	7,27E-02	2,46E-02	3,18E-02	7,75E-02	3,05E-02	3,27E-02

¹²⁾ Wichtung der Transporte über Produkt aus Transportentfernung (siehe Abschnitt 4.2.6) und gewichteter Bedarf im Zielprozess.

Konventionelle Stahlrohkarosserie im Szenario „ungünstig“

Tabelle E.31: Gesamtbilanz aufgeschlüsselt nach Einzelprozessen der Herstellung und Entsorgung einer Stahlrohkarosserie eines Mittelklasse-Pkw, für das Szenario „ungünstig“. Angegeben sind Mittelwert $\langle x \rangle$, Standardabweichung des Mittelwertes m , Standardabweichung s sowie bei Teilprozessketten der mittlere Stichprobenumfang $\langle n \rangle$. (Teil 1)

				Erzabbau			Pelletieren		
	$\langle x \rangle$	m	s	$\langle x \rangle$	m	s	$\langle x \rangle$	m	s
Prozessleistung									
Energieträger	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ
Steinkohle	1,69E+04	2,44E+03	3,44E+03	7,46E+01	3,49E+01	7,93E+01	7,19E+01	3,20E+01	9,10E+01
Braunkohle	3,66E+02	3,43E+01	6,35E+01	-	-	-	-	-	-
Erdgas	1,29E+03	1,75E+02	4,06E+02	-	-	-	4,40E+01	2,80E+01	8,64E+01
Öl	3,28E+03	5,79E+02	8,13E+02	3,84E+01	1,10E+01	2,21E+01	9,45E+01	4,12E+01	1,22E+02
En. aus Urn ¹⁾	1,78E+03	1,58E+02	2,61E+02	-	-	-	-	-	-
Pot. En. Wasser	2,77E+02	2,47E+01	4,07E+01	-	-	-	-	-	-
Gichtgas	-1,73E+03	1,90E+02	5,70E+02	-	-	-	-	-	-
Koksgas	1,24E+03	3,06E+02	6,89E+02	-	-	-	-	-	-
-1,74E+03	9,60E+01	3,05E+02	-	-	-	-	-	-	-
Konvertergas	-3,45E+02	7,90E+01	1,77E+02	-	-	-	-	-	-
Materialbedarf	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg
Bauxit ²⁾	5,29E+00	2,65E+00	2,69E+00	-	-	-	-	-	-
Bentonit ²⁾	2,03E+00	1,19E+00	2,57E+00	-	-	-	2,03E+00	1,19E+00	2,57E+00
Brannkalk	0,00E+00	8,86E+00	1,36E+01	-	-	-	3,21E+00	1,82E+00	2,81E+00
Eisenerz	0,00E+00	3,20E+01	7,77E+01	6,39E+02	3,20E+01	7,77E+01	- ²⁾	-	-
Sinter	0,00E+00	6,52E+01	1,71E+02	-	-	-	-	-	-
Pellets	0,00E+00	7,71E+01	2,04E+02	-	-	-	-2,00E+02	5,45E+01	1,44E+02
Elektrode	0,00E+00	0,00E+00	5,89E+02	-	-	-	-	-	-
H ₂ SO ₄ ²⁾	1,44E+01	7,93E+00	1,36E+01	-	-	-	-	-	-
Kalkstein	1,94E+02	9,94E+00	1,76E+01	-	-	-	- ²⁾	-	-
Karosserie ²⁾	0,00E+00	2,19E+02	2,19E+02	-	-	-	-	-	-
Legierungen ²⁾	2,51E+00	1,26E+00	1,40E+00	-	-	-	-	-	-
Pech ³⁾	0,00E+00	0,00E+00	2,78E+02	-	-	-	-	-	-
Petrolkoks ²⁾	0,00E+00	0,00E+00	1,11E+01	-	-	-	-	-	-
Roheisen	0,00E+00	3,04E+01	7,52E+01	-	-	-	-	-	-
Rohernz	1,49E+03	2,17E+02	5,71E+02	1,49E+03	2,17E+02	5,71E+02	-	-	-
Rohstahl	0,00E+00	2,88E+01	6,83E+01	-	-	-	-	-	-
Sauerstoff ²⁾	4,96E+01	9,39E+00	1,68E+01	-	-	-	-	-	-
Schlacke u.ä. ⁴⁾	4,77E+01	1,85E+01	2,11E+01	-	-	-	-	-	-
Schrott	-8,04E+01	3,10E+01	6,12E+01	-	-	-	-	-	-
Shredderschrott	-2,79E+02	1,40E+02	1,40E+02	-	-	-	-	-	-
Stahlblech	0,00E+00	1,06E+01	3,89E+01	-	-	-	-	-	-
Stahlbl. gepr. ²⁾	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-	-	-	-	-	-
Vorbrammen	0,00E+00	2,68E+01	6,39E+01	-	-	-	-	-	-
Walzöl ²⁾	5,97E-01	1,91E-01	3,32E-01	-	-	-	-	-	-
Warmband	0,00E+00	2,27E+01	5,60E+01	-	-	-	-	-	-
Zuschläge ¹⁾	8,02E+01	3,26E+01	3,87E+01	-	-	-	-	-	-
Ausbruch	-8,02E+00	1,54E+00	2,04E+00	-	-	-	-	-	-
Auswurf	-7,21E+00	3,62E+00	3,67E+00	-	-	-	-	-	-
Rohbenzol	-2,39E+00	3,77E-01	8,95E-01	-	-	-	-	-	-
Robteer	-9,96E+00	8,57E-01	2,31E+00	-	-	-	-	-	-
Schlacke	-1,99E+02	1,42E+01	4,66E+01	-	-	-	-	-	-
Stäube	-1,66E+01	6,72E+00	1,16E+01	-	-	-	-	-	-
Walzzunder	-1,12E+01	3,92E+00	1,08E+01	-	-	-	-	-	-
Schlamm ²⁾	-4,08E+00	1,12E+00	2,27E+00	-	-	-	-	-	-
Em. in Luft	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg
C ₂ F ₆	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CF ₄	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CH ₄	4,04E+00	1,67E+00	1,80E+00	8,90E-03	4,93E-03	9,39E-03	3,24E-02	1,19E-02	3,27E-02
CO	1,01E+01	1,93E+00	3,79E+00	5,87E-02	3,31E-02	4,46E-02	7,99E-03	3,76E-03	8,59E-03
CO ₂	1,66E+03	8,04E+01	1,62E+02	1,76E+01	8,25E+00	1,65E+01	1,67E+01	5,24E+00	1,43E+01
HCl	9,10E-02	1,71E-02	2,56E-02	2,38E-03	1,23E-03	2,52E-03	2,43E-03	1,58E-03	3,93E-03
HF	8,04E-03	1,64E-03	3,18E-03	2,52E-04	1,39E-04	3,01E-04	1,21E-04	6,46E-05	1,64E-04
N ₂ O	7,05E-03	1,14E-03	1,69E-03	1,43E-04	7,79E-05	1,61E-04	2,64E-04	1,27E-04	2,88E-04
NH ₃	2,54E-02	1,48E-02	5,74E-02	4,57E-05	2,43E-05	5,05E-05	1,34E-05	4,75E-06	1,25E-05
NM ₂ OC	4,60E-01	7,45E-02	1,17E-01	8,47E-03	5,78E-03	9,38E-03	2,05E-02	1,30E-02	2,83E-02
NO _x	2,42E+00	4,44E-01	5,20E-01	2,44E-01	1,31E-01	1,86E-01	3,62E-02	1,27E-02	3,52E-02
SO ₂	4,12E+00	6,49E-01	8,89E-01	8,81E-02	4,56E-02	9,56E-02	1,39E-01	6,29E-02	1,77E-01
Staub	8,80E+00	3,96E+00	5,66E+00	1,95E+00	1,91E+00	2,82E+00	1,69E-01	8,97E-02	1,44E-01

¹⁾ exclusive Bereitstellung

²⁾ Auf Basis des thermischen Wirkungsgrades von Kernkraftwerken (siehe Abschnitt 4.2.5).

³⁾ Stahlrohkarosserie

Tabelle E.32: Gesamtbilanz aufgeschlüsselt nach Einzelprozessen der Herstellung und Entsorgung einer Stahlrohrkarosserie eines Mittelklasse-Pkw, für das Szenario „ungünstig“. Angegeben sind Mittelwert $\langle x \rangle$, Standardabweichung des Mittelwertes m , Standardabweichung s sowie bei Teilprozeßketten der mittlere Stichprobenumfang $\langle n \rangle$. (Teil 2)

	Kalksteinabbau			Kalk-Kalziniieren			Sintern		
	$\langle x \rangle$	m	s	$\langle x \rangle$	m	s	$\langle x \rangle$	m	s
Prozeßwichtung:	1,15E+02	9,80E+00	1,74E+01	5,38E+01	3,53E+00	7,27E+00	4,09E+02	4,61E+01	1,21E+02
Energieträger	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ
Steinkohle	1,07E+00	7,10E-01	1,00E+00	3,63E+02	1,01E+02	1,40E+02	3,04E+01	9,12E+00	1,61E+01
Braunkohle	1,93E-01	1,95E-01	2,78E-01	2,48E+00	5,94E-01	1,16E+00	1,02E+01	1,57E+00	4,70E+00
Erdgas	5,61E-01	4,30E-01	6,11E-01	6,37E+01	5,82E+01	8,71E+01	6,65E+00	9,07E-01	2,82E+00
Öl	9,64E+00	4,86E+00	6,91E+00	1,06E+01	4,97E+00	7,48E+00	1,28E+01	1,71E+00	5,42E+00
E _{spez} aus Uran ¹⁾	9,44E-01	9,48E-01	1,34E+00	1,21E+01	2,71E+00	5,00E+00	4,98E+01	6,38E+00	2,04E+01
Pot. En. Wasser	1,47E-01	1,47E-01	2,09E-01	1,78E+00	4,03E-01	7,41E-01	7,75E+00	1,02E+00	3,18E+00
Gichtgas	-	-	-	-	-	-	5,08E+00	3,75E+00	1,66E+01
Koksgas	-	-	-	-	-	-	5,95E+01	2,98E+01	1,31E+02
Konvertergas	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Materialbedarf	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg
Bauxit ²⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bentonit ²⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Brannkalk	-	-	-	-5,38E+01	3,53E+00	7,27E+00	2,71E+00	1,79E+00	4,41E+00
Eisenerz	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sinter	-	-	-	-	-	-	-4,09E+02	4,61E+01	1,21E+02
Pellets	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Elektrode	-	-	-	-	-	-	-	-	-
H ₂ SO ₄ ²⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kalkstein	1,2E+01	1,08E+00	1,92E+00	1,05E+02	7,39E+00	1,47E+01	-	-	-
Karosserie ²⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Legierungen ²⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Pech ²⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Petrolkoks ²⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Roheisen	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Rohertz	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Rohstahl	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sauerstoff ²⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Schlacke u.ä. ²⁾	-	-	-	-	-	-	3,55E+01	1,82E+01	2,06E+01
Schrott	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Shredderschrott	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Stahlblech	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Stahlbl. gepr. ²⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Vorbrammen	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Walzöl ²⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Warmband	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Zuschläge ²⁾	-	-	-	-	-	-	6,14E+01	3,14E+01	3,56E+01
Ausbruch	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Auswurf	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Rohbenzol	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Rohteer	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Schlacke	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Stäube	-	-	-	-	-	-	4,91E+00	1,73E+00	2,18E+00
Walzzunder	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Schlamm ²⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Em. in Luft	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg
C ₂ F ₆	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CF ₄	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CH ₄	1,15E-03	3,05E-04	4,01E-04	1,02E-01	1,95E-02	4,21E-02	7,61E-02	4,74E-02	7,54E-02
CO	3,03E-04	1,41E-04	1,61E-04	2,63E-02	1,35E-02	1,57E-02	3,81E+00	1,91E+00	3,69E+00
CO ₂	8,76E-01	2,49E-01	3,62E-01	7,05E+01	5,42E+00	1,05E+01	6,67E+01	8,18E+00	2,64E+01
HCl	3,37E-05	3,07E-05	4,29E-05	1,16E-02	6,67E-03	8,01E-03	1,84E-02	8,65E-03	1,69E-02
HF	2,40E-06	2,02E-06	2,96E-06	4,41E-04	2,47E-04	2,98E-04	3,11E-03	1,49E-03	2,91E-03
N ₂ O	9,30E-06	4,42E-06	5,11E-06	3,30E-04	1,43E-04	1,60E-04	2,09E-03	9,97E-04	1,29E-03
NH ₃	3,76E-07	2,60E-07	3,81E-07	1,71E-05	7,81E-06	9,70E-06	1,37E-05	3,01E-06	8,45E-06
NM ₂ VOC	1,73E-03	1,20E-03	1,47E-03	5,44E-03	3,17E-03	6,38E-03	3,51E-02	9,05E-03	1,77E-02
NO _x	1,37E-03	3,26E-04	5,00E-04	6,13E-02	1,54E-02	3,12E-02	2,70E-01	4,11E-02	1,48E-01
SO ₂	1,99E-03	4,24E-04	7,71E-04	1,37E-01	3,55E-02	5,83E-02	5,69E-01	8,69E-02	2,41E-01
Staub	4,20E+00	3,43E+00	4,87E+00	9,96E-01	4,89E-01	5,28E-01	2,21E-01	5,14E-02	9,50E-02

¹⁾ Von Bereitstellung nur Energiebedarf erfaßt.

²⁾ Abbrände, Schlacken, Zunder, Stäube

³⁾ Stahlblech gepreßt

Tabelle E.33: Gesamtbilanz aufgeschlüsselt nach Einzelprozessen der Herstellung und Entsorgung einer Stahlrohrkarosserie eines Mittelklasse-Pkw, für das Szenario „ungünstig“. Angegeben sind Mittelwert $\langle x \rangle$, Standardabweichung des Mittelwertes m , Standardabweichung s sowie bei Teilprozeßketten der mittlere Stichprobenumfang $\langle n \rangle$. (Teil 3)

	Hochofen			Steinkohleförderung			Kokserzeugung		
	$\langle x \rangle$	m	s	$\langle x \rangle$	m	s	$\langle x \rangle$	m	s
Prozeßwirkung	4,55E+02	2,14E+01	5,29E+01	2,94E+02	1,58E+01	5,76E+01	2,14E+02	1,08E+01	3,67E+01
Energieträger	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ
Steinkohle	1,72E+03	3,64E+02	1,12E+03	5,71E+01	3,00E+01	3,39E+01	1,35E+04	2,40E+03	3,23E+03
Braunkohle	3,09E+01	4,88E+00	1,42E+01	-	-	-	7,65E+00	7,60E-01	3,29E+00
Erdgas	9,44E+01	2,83E+01	1,01E+02	-	-	-	3,03E+01	1,81E+01	4,07E+01
Öl	3,05E+02	1,08E+02	5,12E+02	5,20E+02	2,90E+02	2,91E+02	9,82E+00	5,67E-01	3,79E+00
Erz aus Uran ¹⁾	1,51E+02	2,00E+01	6,17E+01	-	-	-	3,73E+01	1,88E+00	1,40E+01
Pot. En. Wasser	2,35E+01	3,19E+00	9,62E+00	-	-	-	5,81E+00	3,38E-01	2,19E+00
Gichtgas	-2,05E+03	1,17E+02	5,12E+02	-	-	-	2,43E+02	1,30E+02	2,28E+02
Koksgas	4,25E+02	1,52E+02	5,47E+02	-	-	-	5,15E+02	1,17E+02	2,15E+02
Konvertergas	-	-	-	-	-	-	-1,74E+03	9,60E+01	3,05E+02
Materialbedarf	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg
Bauxit ¹⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bentonit ¹⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Brannkalk	1,37E+01	6,86E+00	7,01E+00	-	-	-	-	-	-
Eisenerz ⁽⁸⁾	6,28E+02	3,06E+01	7,60E+01	-	-	-	-	-	-
Sinter	4,09E+02	4,61E+01	1,21E+02	-	-	-	-	-	-
Pellets	2,00E+02	5,45E+01	1,44E+02	-	-	-	-	-	-
Elektrode	-	-	-	-	-	-	-	-	-
H ₂ SO ₄ ¹⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kalkstein ⁽⁸⁾	6,24E+01	3,12E+00	7,41E+00	-	-	-	-	-	-
Karosserie ¹⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Legierungen ¹⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Pech ¹⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Petrolkoks ¹⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Roheisen	-4,55E+02	2,14E+01	5,29E+01	-	-	-	-	-	-
Roherz	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Rohstahl	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sauerstoff ¹⁾	7,45E+00	7,46E+00	7,50E+00	-	-	-	-	-	-
Schlacke u.ä. ¹⁾	1,23E+01	3,24E+00	4,72E+00	-	-	-	-	-	-
Schrott	1,52E+00	4,30E-01	6,25E-01	-	-	-	-	-	-
Shredderschrott	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Stahlblech	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Stahlbl. gepr. ¹⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Vorbrammen	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Walzöl ¹⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Warmband	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Zuschläge ¹⁾	9,44E+00	2,35E+00	4,75E+00	-	-	-	-	-	-
Ausbruch	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Auswurf	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Rohbenzol	-	-	-	-	-	-	-2,39E+00	3,77E-01	8,95E-01
Rohteer	-	-	-	-	-	-	-9,96E+00	8,57E-01	2,31E+00
Schlacke	-1,39E+02	1,30E+01	4,46E+01	-	-	-	-	-	-
Stäube	-5,61E+00	8,64E-01	1,98E+00	-	-	-	-	-	-
Walzzunder	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Schlamm ¹⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Em. in Luft	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg
C ₂ F ₆	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CF ₄	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CH ₄	2,68E-02	1,09E-02	3,68E-02	3,39E+00	1,67E+00	1,79E+00	2,38E-02	8,24E-03	2,96E-02
CO	1,02E-01	6,27E-02	1,77E-01	3,11E-02	1,52E-02	1,73E-02	2,03E-01	6,10E-02	1,63E-01
CO ₂	8,70E+02	6,12E+01	1,38E+02	3,80E+01	3,64E+00	8,59E+00	1,51E+02	9,69E+00	3,04E+01
HCl	3,64E-03	1,08E-03	3,17E-03	1,42E-02	6,86E-03	7,60E-03	4,19E-04	1,54E-04	2,56E-04
HF	3,07E-04	6,83E-05	2,00E-04	5,94E-04	2,45E-04	2,78E-04	2,59E-04	1,01E-04	1,14E-04
N ₂ O	8,13E-04	1,53E-04	3,76E-04	4,59E-04	1,63E-04	1,90E-04	2,53E-05	1,02E-05	1,81E-05
NH ₃	5,14E-05	8,42E-06	2,31E-05	3,55E-05	1,36E-05	2,04E-05	2,48E-02	1,48E-02	5,74E-02
NM VOC	1,25E-02	4,18E-03	7,18E-03	2,14E-02	7,44E-03	9,23E-03	7,64E-02	3,47E-02	3,69E-02
NO _x	1,77E-01	3,63E-02	1,01E-01	8,67E-02	1,18E-02	3,21E-02	1,63E-01	1,82E-02	7,60E-02
SO ₂	1,93E-01	4,25E-02	1,43E-01	2,08E-01	2,03E-02	5,62E-02	1,34E-01	2,11E-02	8,96E-02
Staub	6,22E-02	2,62E-02	1,01E-01	8,31E-02	2,96E-02	3,36E-02	5,91E-02	1,19E-02	5,46E-02

¹⁾ Walzzunderschlamm

²⁾ Im Hochofenprozeß miterfaßt.

(8) Einträge über Pellets und Sinter miterfaßt um Kovarianzen zu berücksichtigen.

Tabelle E.34: Gesamtbilanz aufgeschlüsselt nach Einzelprozessen der Herstellung und Entsorgung einer Stahlrohkarosserie eines Mittelklasse-Pkw, für das Szenario „ungünstig“. Angegeben sind Mittelwert $\langle x \rangle$, Standardabweichung des Mittelwertes m , Standardabweichung s sowie bei Teilprozessen der mittlere Stichprobenumfang $\langle n \rangle$. (Teil 4)

Prozeßrichtung	Oxygenstahlerzeugung			Strangguß ⁹⁾			Warmwalzen ⁹⁾		
	$\langle x \rangle$	m	s	$\langle x \rangle$	m	s	$\langle x \rangle$	m	s
	5,01E+02	1,97E+01	4,70E+01	5,01E+02	1,89E+01	4,52E+01	4,77E+02	1,60E+01	3,96E+01
Energieträger	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ
Steinkohle	4,56E+01	1,21E+01	1,69E+01	1,04E+02	3,51E+01	3,77E+01	3,78E+02	2,06E+02	2,88E+02
Braunkohle	1,41E+01	1,56E+00	3,89E+00	8,10E+00	2,00E+00	4,14E+00	3,65E+01	3,67E+00	8,75E+00
Erdgas	8,34E+01	3,70E+01	6,43E+01	5,28E+00	1,25E+00	2,53E+00	2,43E+02	2,08E+02	2,95E+02
Öl	2,49E+01	5,94E+00	1,07E+01	1,04E+01	2,43E+00	4,93E+00	2,42E+02	1,69E+02	2,39E+02
Elektr. aus Uran ⁹⁾	6,79E+01	4,76E+00	1,22E+01	3,96E+01	9,16E+00	1,84E+01	1,78E+02	9,31E+00	2,05E+01
Pot. En. Wasser	1,06E+01	8,02E-01	1,93E+00	6,15E+00	1,44E+00	2,87E+00	2,77E+01	1,66E+00	3,29E+00
Gichtgas	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Koksgas	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Konvertergas	-3,45E+02	7,90E+01	1,77E+02	-	-	-	-	-	-
Materialbedarf	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg
Bauxit ⁹⁾	5,29E+00	2,65E+00	2,69E+00	-	-	-	-	-	-
Bentonit ⁹⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Brannkalk	3,42E+01	3,53E+00	7,27E+00	-	-	-	-	-	-
Eisenerz	1,09E+01	9,46E+00	1,64E+01	-	-	-	-	-	-
Sinter	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Pellets	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Elektrode	-	-	-	-	-	-	-	-	-
H ₂ SO ₄ ⁹⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kalkstein	2,51E+00	1,26E+00	1,27E+00	-	-	-	-	-	-
Karosserie ⁹⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Legierungen ⁹⁾	2,51E+00	1,26E+00	1,27E+00	-	-	-	-	-	-
Pech ⁹⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Petrolkoks ⁹⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Roh Eisen	4,55E+02	2,16E+01	5,34E+01	-	-	-	-	-	-
Roh erz	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Rohstahl	-5,01E+02	1,97E+01	4,70E+01	5,19E+02	1,97E+01	4,70E+01	-	-	-
Sauerstoff ⁹⁾	4,21E+01	5,70E+00	1,28E+01	-	-	-	-	-	-
Schlacke u.ä. ⁹⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Schrott	9,32E+01	8,18E+00	2,41E+01	-1,80E+01	1,91E+00	3,92E+00	-1,46E+01	4,09E+00	7,87E+00
Shredderschrott	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Stahlblech	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Stahlbl. gepr. ⁹⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Vorbrammen	-	-	-	-5,01E+02	1,89E+01	4,52E+01	5,01E+02	1,89E+01	4,52E+01
Walzöl ⁹⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Warmband	-	-	-	-	-	-	-4,77E+02	1,60E+01	3,96E+01
Zuschläge ⁹⁾	1,01E+01	8,29E+00	1,44E+01	-	-	-	-	-	-
Ausbruch	-8,02E+00	1,54E+00	1,68E+00	-	-	-	-	-	-
Auswurf	-7,21E+00	3,62E+00	3,67E+00	-	-	-	-	-	-
Rohbenzol	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Roh teer	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Schlacke	-5,97E+01	5,54E+00	1,35E+01	-	-	-	-	-	-
Stäube	-1,59E+01	6,44E+00	1,12E+01	-	-	-	-	-	-
Walzzunder	-	-	-	-	-	-	-1,01E+01	5,27E+00	1,14E+01
Schlamm ⁹⁾	-	-	-	-	-	-	-4,99E+00	1,48E+00	2,08E+00
Em. in Luft	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg
C ₂ F ₆	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CF ₄	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CH ₄	3,37E-02	1,38E-02	2,44E-02	2,51E-02	1,20E-02	1,42E-02	1,38E-01	5,42E-02	8,13E-02
CO	5,64E+00	2,55E-01	5,58E-01	6,74E-03	4,47E-03	4,51E-03	3,26E-02	2,15E-02	2,87E-02
CO ₂	7,67E+01	1,50E+01	3,31E+01	8,67E+00	2,97E+00	3,36E+00	6,30E+01	1,99E+01	2,85E+01
HCl	1,95E-03	9,59E-04	1,60E-03	3,43E-03	2,09E-03	2,13E-03	1,20E-02	1,02E-02	1,38E-02
HF	1,43E-04	4,15E-05	8,75E-05	1,59E-04	7,89E-05	8,82E-05	6,27E-04	3,72E-04	5,27E-04
N ₂ O	1,62E-04	6,67E-05	1,08E-04	9,88E-05	5,06E-05	5,45E-05	8,58E-04	4,67E-04	6,54E-04
NH ₃	2,12E-05	4,35E-06	9,95E-06	1,25E-05	3,70E-06	6,74E-06	6,74E-05	1,65E-05	3,05E-05
NM VOC	9,16E-02	4,30E-02	4,46E-02	2,45E-03	1,04E-03	1,28E-03	4,94E-02	4,20E-02	5,83E-02
NO _x	6,38E-02	2,15E-02	2,46E-02	2,00E-02	7,59E-03	9,94E-03	1,27E-01	7,21E-02	1,04E-01
SO ₂	5,59E-02	2,13E-02	3,98E-02	4,75E-02	1,73E-02	2,15E-02	4,07E-01	3,12E-01	4,59E-01
Staub	8,51E-02	2,87E-02	5,00E-02	9,38E-03	4,60E-03	5,03E-03	5,63E-02	3,47E-02	4,81E-02

⁹⁾ Über Teilprozesse "Blechherstellung" miteinfaßt.

Tabelle E.35: Gesamtbilanz aufgeschlüsselt nach Einzelprozessen der Herstellung und Entsorgung einer Stahlrohrkarosserie eines Mittelklasse-Pkw, für das Szenario „ungünstig“. Angegeben sind Mittelwert $\langle x \rangle$, Standardabweichung des Mittelwertes m , Standardabweichung s sowie bei Teilprozessketten der mittlere Stichprobenumfang $\langle n \rangle$. (Teil 5)

	Kaltwalzen ⁵⁾			Pressen, Stanzen			Fügen einer Stahlkarosserie		
	$\langle x \rangle$	m	s	$\langle x \rangle$	m	s	$\langle x \rangle$	m	s
Prozeßwichtung	4,33E+02	1,06E+01	2,75E+01	3,10E+02	0,00E+00	0,00E+00	3,10E+02	0,00E+00	0,00E+00
Energieträger	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ
Steinkohle	1,89E+02	5,66E+01	7,81E+01	2,18E+02	8,34E+01	1,38E+02	3,08E+02	8,36E+01	1,04E+02
Braunkohle	6,37E+01	9,63E+00	2,00E+01	7,33E+01	2,07E+01	4,19E+01	1,03E+02	8,88E+00	2,17E+01
Erdgas	5,61E+02	1,11E+02	1,90E+02	4,78E+01	1,31E+01	2,59E+01	6,74E+01	3,20E+00	7,44E+00
Öl	2,03E+02	1,12E+02	1,94E+02	9,41E+01	2,55E+01	5,07E+01	1,33E+02	3,80E+00	1,19E+01
E _{Prim} aus Uran ¹⁾	3,11E+02	3,87E+01	7,28E+01	3,58E+02	9,64E+01	1,90E+02	5,05E+02	2,01E+00	2,67E+00
Pot. En. Wasser	4,84E+01	6,18E+00	1,14E+01	5,57E+01	1,51E+01	2,96E+01	7,86E+01	2,31E+00	2,33E+00
Gichtgas	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Koksgas	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Konvertergas	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Materialbedarf	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg
Bauxit ²⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bentonit ³⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Brantkalk	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Eisenerz	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-	-	-	-	-	-
Sinter	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Pellets	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Elektrode	-	-	-	-	-	-	-	-	-
H ₂ SO ₄ ⁴⁾	1,44E+01	7,93E+00	1,36E+01	-	-	-	-	-	-
Kalkstein	1,12E+01	5,63E+00	5,67E+00	-	-	-	-	-	-
Karosserie ²⁾	-	-	-	-	-	-	-3,10E+02	0,00E+00	0,00E+00
Legierungen ²⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Pech ³⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Petrolkoks ³⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Roheisen	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Roherz	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Rohstahl	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sauerstoff ⁴⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Schlacke u.ä. ⁴⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Schrott	-4,42E+01	1,10E+01	2,56E+01	-1,23E+02	1,06E+01	2,75E+01	-	-	-
Shredderschrott	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Stahlblech	-4,33E+02	1,06E+01	2,75E+01	4,33E+02	1,06E+01	2,75E+01	-	-	-
Stahlbl. gepr. ⁵⁾	-	-	-	-3,10E+02	0,00E+00	0,00E+00	3,10E+02	0,00E+00	0,00E+00
Vorbrannen	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Walzöl ⁵⁾	5,97E-01	1,91E-01	3,32E-01	-	-	-	-	-	-
Warmband	4,77E+02	1,60E+01	3,96E+01	-	-	-	-	-	-
Zuschläge ⁵⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ausbruch	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Auswurf	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Rohbenzol	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Rohteer	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Schlacke	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Stäube	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Walzzunder	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Schlamm ⁶⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Em. in Luft	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg
C2F6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CF4	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CH4	1,82E-01	5,62E-02	7,64E-02	1,99E-02	7,09E-03	1,23E-02	2,81E-02	6,55E-03	8,87E-03
CO	3,46E-02	1,57E-02	2,84E-02	4,84E-03	1,56E-03	2,80E-03	6,83E-03	1,21E-03	1,57E-03
CO2	7,56E+01	1,05E+01	1,82E+01	3,31E+01	8,95E+00	1,77E+01	4,67E+01	1,03E+00	2,66E+00
HCl	1,70E-02	9,07E-03	1,29E-02	5,32E-03	1,58E-03	3,33E-03	7,50E-03	9,35E-04	2,47E-03
HF	9,14E-04	3,52E-04	5,57E-04	5,64E-04	1,99E-04	4,72E-04	7,96E-04	1,82E-04	5,09E-04
N2O	9,76E-04	2,76E-04	4,27E-04	3,20E-04	1,09E-04	2,35E-04	4,52E-04	9,49E-05	2,26E-04
NH3	9,83E-05	2,04E-05	4,36E-05	1,02E-04	3,29E-05	7,18E-05	1,44E-04	2,54E-05	6,55E-05
NM VOC	5,39E-02	4,01E-02	5,68E-02	1,89E-02	1,01E-02	1,34E-02	2,67E-02	1,23E-02	1,24E-02
NOx	1,54E-01	4,34E-02	6,55E-02	6,47E-02	1,84E-02	3,81E-02	9,13E-02	8,38E-03	2,31E-02
SO2	4,23E-01	1,68E-01	3,04E-01	1,68E-01	5,94E-02	1,35E-01	2,37E-01	5,43E-02	1,40E-01
Staub	6,47E-02	2,04E-02	3,18E-02	3,36E-02	1,06E-02	2,36E-02	4,74E-02	7,73E-03	2,14E-02

Tabelle E.36: Gesamtbilanz aufgeschlüsselt nach Einzelprozessen der Herstellung und Entsorgung einer Stahlrohkarosserie eines Mittelklasse-Pkw, für das Szenario „ungünstig“. Angegeben sind Mittelwert $\langle x \rangle$, Standardabweichung des Mittelwertes m , Standardabweichung s sowie bei Teilprozeßketten der mittlere Stichprobenumfang $\langle n \rangle$. (Teil 6)

	TPK Blechherstellung ¹⁰⁾				Shredder		
	$\langle x \rangle$	m	s	$\langle n \rangle$	$\langle x \rangle$	m	s
Prozeßwichtung	4,33E+02	1,06E+01	2,75E+01	0,00E+00	2,79E+02	1,40E+02	1,40E+02
Energieträger	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ
Steinkohle	4,04E+02	2,24E+02	3,27E+02	6,82E+00	5,66E+01	4,89E+01	6,22E+01
Braunkohle	9,05E+01	1,78E+01	2,87E+01	8,00E+00	1,90E+01	1,57E+01	2,03E+01
Erdgas	8,34E+02	1,54E+02	3,64E+02	5,77E+00	1,24E+01	1,02E+01	1,30E+01
Öl	2,73E+02	1,56E+02	2,76E+02	6,69E+00	2,81E+01	2,13E+01	2,66E+01
En _{min} aus Uran ¹⁾	4,42E+02	8,71E+01	1,15E+02	8,00E+00	9,29E+01	7,62E+01	9,72E+01
Pot. En. Wasser	6,87E+01	1,36E+01	1,79E+01	8,00E+00	1,44E+01	1,19E+01	1,51E+01
Gichtgas	7,35E+01	7,36E+01	1,04E+02	2,00E+00	-	-	-
Koksgas	2,37E+02	2,37E+02	3,35E+02	2,00E+00	-	-	-
Konvertergas	-	-	-	0,00E+00	-	-	-
Materialbedarf	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg
Bauxit ¹⁾	-	-	-	0,00E+00	-	-	-
Bentonit ¹⁾	-	-	-	0,00E+00	-	-	-
Brannkalk	-	-	-	0,00E+00	-	-	-
Eisenerz	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-	-	-
Sinter	-	-	-	0,00E+00	-	-	-
Pellets	-	-	-	0,00E+00	-	-	-
Elektrode	-	-	-	0,00E+00	-	-	-
H ₂ SO ₄ ¹⁾	1,44E+01	7,93E+00	1,36E+01	3,00E+00	-	-	-
Kalkstein	1,12E+01	5,63E+00	5,67E+00	1,00E+00	-	-	-
Karosserie ²⁾	-	-	-	0,00E+00	3,10E+02	2,19E+02	2,19E+02
Legierungen ¹⁾	-	-	-	0,00E+00	-	-	-
Pech ³⁾	-	-	-	0,00E+00	-	-	-
Petrolkoks ³⁾	-	-	-	0,00E+00	-	-	-
Roheisen	-	-	-	0,00E+00	-	-	-
Rohernz	-	-	-	-	-	-	-
Rohstahl	5,01E+02	2,11E+01	4,95E+01	7,00E+00	-	-	-
Sauerstoff ¹⁾	-	-	-	0,00E+00	-	-	-
Schlacke u.ä. ⁴⁾	-	-	-	0,00E+00	-	-	-
Schrott	-5,26E+01	2,80E+01	4,90E+01	9,34E+00	-	-	-
Shredderschrott	-	-	-	0,00E+00	-2,79E+02	1,40E+02	1,40E+02
Stahlblech	-4,33E+02	0,00E+00	2,75E+01	2,00E+00	-	-	-
Stahlbl. gepr. ⁵⁾	-	-	-	0,00E+00	-	-	-
Vorbrammen	0,00E+00	2,68E+01	6,39E+01	3,00E+00	-	-	-
Walzöl ¹⁾	5,97E-01	1,91E-01	3,32E-01	3,00E+00	-	-	-
Warmband	0,00E+00	2,27E+01	5,60E+01	3,50E+00	-	-	-
Zuschläge ⁴⁾	-	-	-	0,00E+00	-	-	-
Ausbruch	-	-	-	0,00E+00	-	-	-
Auswurf	-	-	-	0,00E+00	-	-	-
Rohbenzol	-	-	-	0,00E+00	-	-	-
Rohleer	-	-	-	0,00E+00	-	-	-
Schlacke	-	-	-	0,00E+00	-	-	-
Stäube	-	-	-	0,00E+00	-	-	-
Walzzunder	-1,12E+01	3,92E+00	1,08E+01	7,00E+00	-	-	-
Schlamm ⁶⁾	-4,08E+00	1,12E+00	2,27E+00	5,00E+00	-	-	-
Em. in Luft	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg
C ₂ F ₆	-	-	-	0,00E+00	-	-	-
CP ₄	-	-	-	0,00E+00	-	-	-
CH ₄	2,69E-01	8,08E-02	9,61E-02	4,73E+00	5,54E-03	4,52E-03	5,73E-03
CO	5,91E-02	1,65E-02	2,57E-02	4,99E+00	1,36E-03	1,09E-03	1,37E-03
CO ₂	1,33E+02	1,69E+01	4,22E+01	5,32E+00	8,88E+00	7,14E+00	9,08E+00
HCl	2,09E-02	1,08E-02	1,22E-02	5,57E+00	1,39E-03	1,15E-03	1,51E-03
HF	1,20E-03	4,54E-04	8,12E-04	6,21E+00	1,46E-04	1,25E-04	1,79E-04
N ₂ O	1,53E-03	4,08E-04	8,28E-04	5,20E+00	8,93E-05	7,23E-05	9,79E-05
NH ₃	1,45E-04	3,04E-05	6,40E-05	6,81E+00	2,66E-05	2,22E-05	3,02E-05
NM ₄ VOC	6,65E-02	3,48E-02	8,92E-02	5,45E+00	5,57E-03	4,83E-03	5,79E-03
NO _x	2,38E-01	6,25E-02	1,25E-01	5,40E+00	1,75E-02	1,41E-02	1,82E-02
SO ₂	5,71E-01	2,83E-01	5,24E-01	5,71E+00	4,76E-02	3,84E-02	5,34E-02
Staub	9,35E-02	3,51E-02	6,01E-02	5,90E+00	9,67E-03	7,59E-03	1,02E-02

¹⁰⁾ Einzelprozesse "Stranggüß", "Warmwalzen" und "Kaltwalzen" bereits eingefaltet.

Tabelle E.37: Gesamtbilanz aufgeschlüsselt nach Einzelprozessen der Herstellung und Entsorgung einer Stahlrohkarosserie eines Mittelklasse-Pkw, für das Szenario „ungünstig“. Angegeben sind Mittelwert $\langle x \rangle$, Standardabweichung des Mittelwertes m , Standardabweichung s sowie bei Teilprozessketten der mittlere Stichprobenumfang $\langle n \rangle$. (Teil 7)

	Elektrostahlerzeugung			Elektrodenherstellung			Transport ¹⁰⁾		
	$\langle x \rangle$	m	s	$\langle x \rangle$	m	s	$\langle x \rangle$	m	s
	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	4,16E-02			
Prozeßwichtung	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ
Energieträger	0,00E+00	0,00E+00	9,21E+01	0,00E+00	0,00E+00	2,65E-01	4,13E+01	2,81E+01	2,96E+01
Steinkohle	0,00E+00	0,00E+00	1,50E+01	0,00E+00	0,00E+00	2,44E-02	1,39E+01	8,76E+00	9,23E+00
Braunkohle	0,00E+00	0,00E+00	7,83E+00	0,00E+00	0,00E+00	5,61E-01	9,04E+00	5,67E+00	5,79E+00
Erdgas	0,00E+00	0,00E+00	1,51E+01	0,00E+00	0,00E+00	2,94E-02	1,73E+03	4,60E+02	4,67E+02
Öl	0,00E+00	0,00E+00	5,21E+01	0,00E+00	0,00E+00	1,10E-01	6,77E+01	4,24E+01	4,27E+01
E_{netto} aus Uran ¹⁾	0,00E+00	0,00E+00	8,18E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,72E-02	1,05E+01	6,60E+00	6,65E+00
Pot. En. Wasser	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Gichtgas	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Koksgas	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Konvertergas	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Materialbedarf	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg
Bauxit ²⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bentonit ³⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Brannkalk	0,00E+00	0,00E+00	1,47E+00	-	-	-	-	-	-
Eisenerz	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sinter	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Pellets	0,00E+00	0,00E+00	4,16E-02	-0,00E-01	0,00E+00	4,16E-02	-	-	-
Elektrode	-	-	-	-	-	-	-	-	-
H ₂ SO ₄ ⁴⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kalkstein	0,00E+00	0,00E+00	8,35E-02	-	-	-	-	-	-
Karosserie ⁵⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Legierungen ²⁾	0,00E+00	0,00E+00	5,79E-01	-	-	-	-	-	-
Pech ³⁾	-	-	-	0,00E+00	0,00E+00	2,78E-02	-	-	-
Petrolkoks ³⁾	-	-	-	0,00E+00	0,00E+00	1,11E-01	-	-	-
Roh Eisen	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Roh erz	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Rohstahl	-0,00E-01	0,00E+00	0,00E+00	-	-	-	-	-	-
Sauerstoff ⁴⁾	0,00E+00	0,00E+00	7,90E+00	-	-	-	-	-	-
Schlacke u.ä. ⁴⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Schrott	0,00E+00	0,00E+00	2,80E+00	-	-	-	-	-	-
Shredderschrott	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Stahlblech	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Stahlbl. gepr. ³⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Vorbrammen	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Walzöl ¹⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Warmband	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Zuschläge ³⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ausbruch	-0,00E-01	0,00E+00	1,16E+00	-	-	-	-	-	-
Auswurf	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Rohbenzol	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Roh teer	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Schlacke	-0,00E-01	0,00E+00	1,58E+00	-	-	-	-	-	-
Stäube	-0,00E-01	0,00E+00	1,33E+00	-	-	-	-	-	-
Walzzunder	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Schlamm ⁶⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Em. in Luft	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg
C ₂ F ₆	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CF ₄	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CH ₄	0,00E+00	0,00E+00	3,66E-02	0,00E+00	0,00E+00	1,94E-04	1,84E-02	6,84E-03	6,96E-03
CO	0,00E+00	0,00E+00	5,67E-01	0,00E+00	0,00E+00	2,81E-05	1,36E-01	5,70E-02	5,76E-02
CO ₂	0,00E+00	0,00E+00	5,40E+00	0,00E+00	0,00E+00	5,02E-02	1,25E+02	4,22E+01	4,29E+01
HCl	0,00E+00	0,00E+00	6,90E-03	0,00E+00	0,00E+00	2,52E-06	1,01E-03	6,42E-04	7,16E-04
HF	0,00E+00	0,00E+00	3,60E-04	0,00E+00	0,00E+00	3,62E-07	1,07E-04	7,11E-05	9,58E-05
N ₂ O	0,00E+00	0,00E+00	2,01E-04	0,00E+00	0,00E+00	7,32E-07	3,64E-04	1,43E-04	1,48E-04
NH ₃	0,00E+00	0,00E+00	3,59E-05	0,00E+00	0,00E+00	5,48E-08	1,93E-05	1,26E-05	1,50E-05
NM VOC	0,00E+00	0,00E+00	7,53E-03	0,00E+00	0,00E+00	5,32E-05	6,89E-02	2,51E-02	2,54E-02
NO _x	0,00E+00	0,00E+00	3,11E-02	0,00E+00	0,00E+00	5,84E-05	9,09E-01	4,14E-01	4,18E-01
SO ₂	0,00E+00	0,00E+00	7,86E-02	0,00E+00	0,00E+00	2,27E-04	1,57E+00	5,62E-01	5,77E-01
Staub	0,00E+00	0,00E+00	2,10E-02	0,00E+00	0,00E+00	2,57E-05	7,69E-02	2,32E-02	2,39E-02

¹⁰⁾ Wichtung über Produkt aus Transportentfernung (siehe Abschnitt 4.2.6) und gewichteter Bedarf im Zielprozeß.

Aluminiumrohkarosserie im Szenario „ungünstig“

Tabelle E.38: Gesamtbilanz aufgeschlüsselt nach Einzelprozessen der Herstellung und Entsorgung einer Aluminiumrohkarosserie eines Mittelklasse-Pkw, für das Szenario „ungünstig“. Angegeben sind Mittelwert $\langle x \rangle$, Standardabweichung des Mittelwertes m , Standardabweichung s sowie bei Teilprozessketten der mittlere Stichprobenumfang $\langle n \rangle$. (Teil 1)

Prozesskategorie				Bauxitabbau ¹⁾			Bayer-Prozess ¹⁾		
	$\langle x \rangle$	m	s	$\langle x \rangle$	m	s	$\langle x \rangle$	m	s
Energieträger	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ
Steinkohle	2,14E+04	4,72E+03	6,71E+03	7,23E+00	4,19E+00	4,69E+00	1,34E+03	5,80E+02	1,11E+03
Braunkohle	2,69E+03	2,62E+02	6,01E+02	-	-	-	2,49E+02	7,10E+01	1,46E+02
Erdgas	8,01E+03	9,28E+02	1,55E+03	-	-	-	1,47E+03	5,46E+02	1,10E+03
Öl	1,65E+04	3,69E+03	2,33E+03	9,70E+02	4,23E+02	4,57E+02	5,79E+03	1,05E+03	1,95E+03
Epoxid aus Uran ¹⁾	1,29E+04	1,04E+03	2,28E+03	-	-	-	1,22E+03	3,30E+02	6,64E+02
Pot. En. Wasser	1,20E+04	1,25E+03	2,73E+03	-	-	-	1,89E+02	5,17E+01	1,03E+02
Materialbedarf	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg
Abbrand	-1,19E+01	4,25E+00	9,41E+00	-	-	-	-	-	-
AlF ₃	0,00E+00	2,65E+00	5,32E+00	-	-	-	-	-	-
Alu. primär	0,00E+00	3,85E+01	1,06E+02	-	-	-	-	-	-
Alu. sekundär	-8,39E+01	3,20E+01	6,73E+01	-	-	-	-	-	-
Al. Walzbarren	0,00E+00	4,57E+01	7,92E+01	-	-	-	-	-	-
Walzb. hom. ²⁾	0,00E+00	4,57E+01	7,92E+01	-	-	-	-	-	-
Alu.-Blech	0,00E+00	4,93E+00	9,08E+00	-	-	-	-	-	-
Blech gepreßt	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-	-	-	-	-	-
Anode ²⁾	0,00E+00	2,20E+01	5,24E+01	-	-	-	-	-	-
Bauxit	0,00E+00	2,00E+02	3,03E+02	-1,27E+03	1,41E+02	3,01E+02	1,26E+03	1,41E+02	3,01E+02
Brannkalk	0,00E+00	7,09E+00	1,34E+01	-	-	-	3,16E+01	5,01E+00	9,50E+00
H ₂ SiF ₆ ²⁾	5,76E+00	3,25E+00	4,19E+00	-	-	-	-	-	-
Kalkstein	6,92E+01	9,97E+00	1,88E+01	-	-	-	-	-	-
Kaltband Al.	0,00E+00	4,04E+01	7,00E+01	-	-	-	-	-	-
Kar. Alu. ⁴⁾	0,00E+00	1,42E+02	1,72E+02	-	-	-	-	-	-
Kar. ungeh. ²⁾	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-	-	-	-	-	-
Kieselsäure	-3,84E+00	2,17E+00	2,79E+00	-	-	-	-	-	-
Kraetz ^{2,9)}	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-	-	-	-	-	-
Legierungen ²⁾	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-	-	-	-	-	-
NaOH	0,00E+00	2,43E+01	5,72E+01	-	-	-	8,10E+01	1,72E+01	4,04E+01
Pech ²⁾	3,25E+01	6,38E+00	1,36E+01	-	-	-	-	-	-
Petrolkoks ²⁾	1,09E+02	1,35E+01	3,10E+01	-	-	-	-	-	-
Rohförderung	2,47E+03	1,09E+03	3,24E+03	2,47E+03	1,09E+03	3,24E+03	-	-	-
Sand ²⁾	8,20E-03	4,45E-03	5,76E-03	-	-	-	-	-	-
Schmelzsatz ²⁾	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-	-	-	-	-	-
Schrott neu	0,00E+00	4,05E+01	7,02E+01	-	-	-	-	-	-
Shredderschrott	-1,71E+02	8,56E+01	1,06E+02	-	-	-	-	-	-
Steinsalz	6,07E+01	1,28E+01	3,00E+01	-	-	-	-	-	-
Tonerde	0,00E+00	6,34E+01	1,85E+02	-	-	-	-5,85E+02	6,34E+01	1,31E+02
Walzöl ¹⁾	1,39E+00	1,10E-01	1,80E-01	-	-	-	-	-	-
Warmband Al.	0,00E+00	4,04E+01	7,00E+01	-	-	-	-	-	-
Ausbruch	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-	-	-	-	-	-
Cl ₂	-3,68E+01	7,74E+00	1,82E+01	-	-	-	-	-	-
H ₂	-1,04E+00	2,19E-01	5,13E-01	-	-	-	-	-	-
Stäube	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-	-	-	-	-	-
Em. in Luft	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg
C ₂ F ₆	5,05E-02	1,01E-02	1,97E-02	-	-	-	-	-	-
CF ₄	2,01E-01	6,96E-02	1,81E-01	-	-	-	-	-	-
CH ₄	3,21E+00	3,37E-01	7,58E-01	5,94E-02	3,11E-02	3,45E-02	1,24E+00	2,90E-01	6,26E-01
CO	2,87E+01	7,54E+00	2,04E+01	1,65E-02	8,65E-03	9,58E-03	2,88E-01	1,11E-01	1,84E-01
CO ₂	3,73E+03	2,64E+02	5,46E+02	7,58E+01	3,82E+01	4,14E+01	5,93E+02	8,77E+01	1,88E+02
HCl	4,76E-01	6,47E-02	1,57E-01	1,30E-03	5,95E-04	6,75E-04	7,56E-02	4,64E-02	8,62E-02
HF	3,81E-01	1,59E-01	2,71E-02	3,82E-05	1,49E-05	2,14E-05	3,52E-03	1,70E-03	3,19E-03
N ₂ O	3,69E-02	4,99E-03	8,06E-03	1,01E-03	5,29E-04	5,87E-04	9,39E-03	3,61E-03	5,91E-03
NH ₃	7,61E-03	1,36E-03	1,34E-05	3,64E-03	5,50E-06	6,52E-06	3,65E-04	1,02E-04	2,14E-04
NM ₂ OC	2,38E+00	4,61E-01	7,92E-01	1,04E-01	5,48E-02	6,07E-02	6,82E-01	3,99E-01	6,19E-01
NO _x	7,48E+00	9,72E-01	1,75E+00	1,93E-01	9,98E-02	6,89E-02	1,22E+00	3,02E-01	6,63E-01
SO ₂	2,13E+01	2,58E+00	6,40E+00	6,33E-01	3,33E-01	3,69E-01	4,73E+00	1,68E+00	3,94E+00
Staub	8,31E+00	1,59E+00	3,21E+00	4,91E-02	2,54E-02	2,82E-02	5,15E-01	2,60E-01	3,22E-01

¹⁾ exclusive Bereitstellung

²⁾ Auf Basis des thermischen Wirkungsgrades von Kernkraftwerken (siehe Abschnitt 4.2.5).

Tabelle E.39: Gesamtbilanz aufgeschlüsselt nach Einzelprozessen der Herstellung und Entsorgung einer Aluminiumrohkarosserie eines Mittelklasse-Pkw, für das Szenario „ungünstig“. Angegeben sind Mittelwert $\langle x \rangle$, Standardabweichung des Mittelwertes m , Standardabweichung s sowie bei Teilprozessketten der mittlere Stichprobenumfang $\langle n \rangle$. (Teil 2)

	Natronlauge (mit Steinsalzabbau) ²⁾			Kalksteinabbau ³⁾			Kalk-Kalzinieren ³⁾		
	$\langle x \rangle$	m	s	$\langle x \rangle$	m	s	$\langle x \rangle$	m	s
Prozeßwichtung	8,20E+01	1,72E+01	4,04E+01	6,20E+01	9,90E+00	1,87E+01	3,18E+01	5,01E+00	9,50E+00
Energieträger	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ
Steinkohle	3,46E+02	1,22E+02	2,12E+02	5,76E-01	3,89E-01	5,58E-01	2,14E+02	6,65E+01	9,56E+01
Braunkohle	1,04E+02	2,73E+01	5,91E+01	1,04E-01	1,06E-01	1,52E-01	1,46E+00	4,03E-01	7,50E-01
Erdgas	1,48E+02	8,24E+01	1,31E+02	3,01E-01	2,34E-01	3,37E-01	3,76E+01	3,47E+01	4,97E+01
Öl	3,65E+02	1,68E+02	2,78E+02	5,18E+00	2,69E+00	3,93E+00	6,24E+00	3,00E+00	4,34E+00
En _{prim} aus Uran ¹⁾	5,08E+02	1,26E+02	2,68E+02	5,07E-01	5,14E-01	7,33E-01	7,15E+00	1,87E+00	3,34E+00
Pot. En. Wasser	7,89E+01	1,98E+01	4,17E+01	7,89E-02	7,99E-02	1,14E-01	1,05E+00	2,82E-01	5,03E-01
Materialbedarf	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg
Abbrand	-	-	-	-	-	-	-	-	-
AlF ₃	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alu. primär	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alu. sekundär	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Al. Walzbarren	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Walzb. hom. ²⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alu.-Blech	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Blech gepreßt	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Anode ³⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bauxit	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Brantkalk	-	-	-	-	-	-	-3,18E+01	5,01E+00	9,50E+00
H ₂ SiF ₆ ⁷⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kalkstein	4,30E-01	2,33E-01	3,02E-01	6,82E+00	1,09E+00	2,05E+00	6,20E+01	9,90E+00	1,87E+01
Kaltband Al.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kar. Alu. ⁴⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kar. ungeh. ²⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kieselsäure	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kraetz ^{5,6)}	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Legierungen ¹⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NaOH	-8,20E+01	1,72E+01	4,04E+01	-	-	-	-	-	-
Pech ⁷⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Petrolkoks ⁷⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Roherz.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sand ¹⁾	8,20E-03	4,45E-03	5,76E-03	-	-	-	-	-	-
Schmelzsalz	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Schrott neu	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Shredderschrott	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Steinsalz	6,07E+01	1,28E+01	3,00E+01	-	-	-	-	-	-
Tonerde	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Walzöl ¹⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Warmband Al.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ausbruch	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cl ₂	-3,68E+01	7,74E+00	1,82E+01	-	-	-	-	-	-
H ₂	-1,04E+00	2,19E-01	5,13E-01	-	-	-	-	-	-
Stäube	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Em. in Luft	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg
C ₂ F ₆	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CF ₄	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CH ₄	7,49E-02	1,83E-02	-	6,16E-04	1,84E-04	2,69E-04	6,02E-02	1,44E-02	2,86E-02
CO	1,80E-02	5,52E-03	-	1,63E-04	7,87E-05	9,63E-05	1,55E-02	8,27E-03	9,72E-03
CO ₂	7,25E+01	1,99E+01	-	4,70E-01	1,48E-01	2,30E-01	4,16E+01	6,78E+00	1,27E+01
HCl	9,20E-03	2,25E-03	3,84E-03	1,81E-05	1,67E-05	2,35E-05	6,85E-03	4,06E-03	4,85E-03
HF	8,54E-04	2,65E-04	-	1,29E-06	1,10E-06	1,62E-06	2,61E-04	1,50E-04	1,81E-04
N ₂ O	9,33E-04	4,08E-04	-	4,99E-06	2,47E-06	3,04E-06	1,95E-04	8,89E-05	1,04E-04
NH ₃	1,51E-04	4,54E-05	-	2,02E-07	1,42E-07	2,11E-07	1,01E-05	4,83E-06	6,08E-06
NM _{VOC}	6,92E-02	4,46E-02	-	9,27E-04	6,55E-04	8,23E-04	3,21E-03	1,93E-03	3,68E-03
NO _x	1,49E-01	4,97E-02	-	7,34E-04	2,02E-04	3,29E-04	3,62E-02	1,05E-02	2,00E-02
SO ₂	5,06E-01	2,44E-01	-	1,07E-03	2,70E-04	4,99E-04	8,08E-02	2,39E-02	3,92E-02
Staub	7,07E-02	2,56E-02	7,88E-02	2,63E+00	1,88E+00	2,70E+00	5,88E-01	3,01E-01	3,36E-01

²⁾ Aluminiumwalzbarren homogenisiert

³⁾ Nettoverbrauch

⁴⁾ Aluminiumrohkarosserie

⁵⁾ Aluminiumrohkarosserie ungehärtet

Tabelle E.40: Gesamtbilanz aufgeschlüsselt nach Einzelprozessen der Herstellung und Entsorgung einer Aluminiumrohkarosserie eines Mittelklasse-Pkw, für das Szenario „ungünstig“. Angegeben sind Mittelwert $\langle x \rangle$, Standardabweichung des Mittelwertes m , Standardabweichung s sowie bei Teilprozessketten der mittlere Stichprobenumfang $\langle n \rangle$. (Teil 3)

Prozeßrichtung	Elektrolyse ²⁾			Aluminiumfluoridherstellung ¹⁾			Anodenherstellung für Al-Elektrolyse ³⁾		
	$\langle x \rangle$	m	s	$\langle x \rangle$	m	s	$\langle x \rangle$	m	s
Energieträger	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ
Steinkohle	1,66E+04	4,70E+03	6,57E+03	3,79E+02	1,76E+02	1,86E+02	6,99E+02	2,67E+02	3,31E+02
Braunkohle	1,69E+03	2,34E+02	5,41E+02	3,58E+00	3,61E+00	5,16E+00	2,82E+01	7,78E+00	1,39E+01
Erdgas	1,55E+03	0,00E+00	0,00E+00	2,33E+00	2,34E+00	3,33E+00	8,40E+02	2,81E+02	4,51E+02
Öl	6,66E+03	3,48E+03	1,00E+03	1,57E+02	6,41E+01	6,86E+01	4,27E+01	1,09E+01	1,81E+01
E _{prim} aus Uran	7,99E+03	8,70E+02	1,93E+03	5,84E+00	6,03E+00	8,81E+00	1,62E+02	4,11E+01	6,74E+01
Pot. En. Wasser	1,12E+04	1,26E+03	2,72E+03	9,08E-01	9,39E-01	1,37E+00	2,52E+01	6,43E+00	1,05E+01
Materialbedarf	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg
Abbrand	-	-	-	-	-	-	-	-	-
AlF ₃	7,13E+00	1,87E+00	3,76E+00	-7,13E+00	1,87E+00	3,76E+00	-	-	-
Alu. primär	-3,06E+02	3,32E+01	6,85E+01	-	-	-	-	-	-
Alu. sekundär	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Al. Walzbarren	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Walzb. hom. ²⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alu.-Blech	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Blech gepreßt	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Anode ³⁾	1,42E+02	1,56E+01	3,70E+01	-	-	-	-1,42E+02	1,56E+01	3,70E+01
Bauxit	-	-	-	1,09E+01	6,15E+00	7,92E+00	-	-	-
Brantkalk	-	-	-	1,98E-01	1,12E-01	1,44E-01	-	-	-
H ₂ SiF ₆ ³⁾	-	-	-	5,76E+00	3,25E+00	4,19E+00	-	-	-
Kalkstein	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kaltband Al.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kar. Alu. ²⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kar. ungeh. ²⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kieselsäure	-	-	-	-3,84E+00	2,17E+00	2,79E+00	-	-	-
Kraetze ^{2),3)}	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Legierungen ²⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NaOH	-	-	-	9,51E-01	5,37E-01	6,91E-01	-	-	-
Pech ²⁾	-	-	-	-	-	-	3,25E+01	6,38E+00	1,36E+01
Petrolkoks ²⁾	-	-	-	-	-	-	1,09E+02	1,35E+01	3,10E+01
Roherz	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sand ²⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Schmelzsatz	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Schrott neu	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Shredderschrott	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Steinsatz	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Tonerde	5,85E+02	6,34E+01	1,31E+02	-	-	-	-	-	-
Walzöl ²⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Warmband Al.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ausbruch	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cl ₂	-	-	-	-	-	-	-	-	-
H ₂	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Stäube	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Em. in Luft	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg
C ₂ F ₆	5,05E-02	1,01E-02	1,97E-02	-	-	-	-	-	-
CF ₄	2,21E-01	8,62E-02	1,75E-01	-	-	-	-	-	-
CH ₄	6,89E-01	1,45E-01	2,43E-01	6,81E-02	3,41E-02	4,95E-02	1,49E-01	6,09E-02	1,08E-01
CO	2,97E+01	8,84E+00	1,99E+01	1,85E-02	1,19E-02	1,46E-02	2,31E-02	1,30E-02	1,58E-02
CO ₂	2,04E+03	2,33E+02	4,90E+02	2,41E+01	1,04E+01	1,52E+01	1,54E+02	6,90E+01	7,99E+01
HCl	3,18E-01	4,97E-02	1,26E-01	7,51E-03	5,36E-03	6,37E-03	2,38E-03	6,51E-04	1,18E-03
HF	3,92E-01	1,68E-01	2,68E-02	1,72E-03	8,63E-04	1,17E-03	2,52E-04	8,06E-05	1,73E-04
N ₂ O	1,60E-02	2,92E-03	4,79E-03	3,77E-04	2,07E-04	2,87E-04	6,58E-04	3,32E-04	4,12E-04
NH ₃	6,15E-03	1,35E-03	3,62E-03	1,48E-05	8,06E-06	1,14E-05	4,69E-05	1,37E-05	2,61E-05
NM VOC	7,79E-01	2,55E-01	3,01E-01	2,29E-02	1,59E-02	1,91E-02	1,63E-02	3,55E-02	7,68E-02
NO _x	3,57E+00	6,74E-01	1,45E+00	5,97E-02	2,64E-02	4,05E-02	1,37E-01	5,50E-02	6,62E-02
SO ₂	9,45E+00	1,98E+00	4,78E+00	2,08E-01	9,56E-02	1,54E-01	1,65E-01	6,25E-02	9,33E-02
Staub	3,51E+00	1,04E+00	1,59E+00	9,75E-02	4,57E-02	6,39E-02	6,77E-02	3,12E-02	3,59E-02

¹⁾ Ohne Aluminiumanteil.²⁾ Von Bereitstellung nur Energiebedarf erfaßt.³⁾ Über Teilprozesskette "Tonerde" miterfaßt.

Tabelle E.41: Gesamtbilanz aufgeschlüsselt nach Einzelprozessen der Herstellung und Entsorgung einer Aluminiumrohkarosserie eines Mittelklasse-Pkw, für das Szenario „ungünstig“. Angegeben sind Mittelwert $\langle x \rangle$, Standardabweichung des Mittelwertes m , Standardabweichung s sowie bei Teilprozessen der mittlere Stichprobenumfang $\langle n \rangle$. (Teil 4)

	Walzbarrenherstellung			Homogenisieren			Warmwalzen von Aluminium		
	$\langle x \rangle$	m	s	$\langle x \rangle$	m	s	$\langle x \rangle$	m	s
Prozeßwichtung	3,95E+02	3,23E+01	5,60E+01	3,95E+02	3,23E+01	5,60E+01	3,50E+02	2,85E+01	4,95E+01
Energieträger	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ
Steinkohle	7,58E+01	2,21E+01	3,04E+01	5,78E+01	1,65E+01	2,14E+01	1,54E+02	4,84E+01	6,38E+01
Braunkohle	2,55E+01	3,46E+00	7,65E+00	1,94E+01	2,36E+00	4,98E+00	5,17E+01	9,29E+00	1,64E+01
Erdgas	1,03E+03	2,26E+02	5,33E+02	7,23E+02	3,40E+02	3,53E+02	3,37E+01	5,55E+00	8,83E+00
Öl	3,27E+01	3,56E+00	7,61E+00	2,49E+01	2,26E+00	4,29E+00	6,64E+01	1,06E+01	1,69E+01
Erz aus Uran ¹⁾	1,24E+02	1,31E+01	2,67E+01	9,49E+01	8,19E+00	1,39E+01	2,53E+02	3,99E+01	6,00E+01
Pot. En. Wasser	1,94E+01	2,11E+00	4,19E+00	1,48E+01	1,34E+00	2,21E+00	3,93E+01	6,31E+00	9,41E+00
Materialbedarf	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg
Abbrand	-1,19E+01	4,25E+00	9,41E+00	-	-	-	-	-	-
AlF ₃	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alu. primär	3,06E+02	3,85E+01	8,12E+01	-	-	-	-	-	-
Alu. sekundär	1,01E+02	1,68E+01	3,49E+01	-	-	-	-	-	-
Al. Walzbarren	-3,95E+02	3,23E+01	5,60E+01	3,95E+02	3,23E+01	5,60E+01	-	-	-
Walzb. hom. ²⁾	-	-	-	-3,95E+02	3,23E+01	5,60E+01	3,95E+02	3,23E+01	5,60E+01
Alu.-Blech	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Blech gepreßt	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Anode ³⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bauxit	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Brannkalk	-	-	-	-	-	-	-	-	-
H ₂ SiF ₆ ⁴⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kalkstein	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kaltband Al.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kar. Alu. ⁴⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kar. ungeh. ⁵⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kieselsäure	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kraetze ⁶⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Legierungen ⁷⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NaOH	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Pech ⁷⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Petrolkoks ⁷⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Roherz	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sand ⁷⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Schmelzsalz	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Schrott neu	-	-	-	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-4,45E+01	4,93E+00	7,86E+00
Shredderschrott	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Steinsalz	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Tonerde	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Walzöl ⁷⁾	-	-	-	-	-	-	6,22E-01	7,92E-02	1,23E-01
Warmband Al.	-	-	-	-	-	-	-3,50E+02	2,85E+01	4,95E+01
Ausbruch	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cl ₂	-	-	-	-	-	-	-	-	-
H ₂	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Stäube	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Em. in Luft	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg
C ₂ F ₆	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CF ₄	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CH ₄	1,79E-01	5,87E-02	1,33E-01	1,26E-01	6,83E-02	1,06E-01	1,40E-02	3,96E-03	5,55E-03
CO	2,75E-02	1,43E-02	1,92E-02	3,19E-02	1,55E-02	1,60E-02	3,42E-03	8,08E-04	1,13E-03
CO ₂	7,25E+01	1,43E+01	3,34E+01	5,16E+01	2,18E+01	2,26E+01	2,34E+01	3,72E+00	5,71E+00
HCl	2,20E-02	1,00E-02	1,04E-02	1,89E-03	3,38E-04	5,89E-04	3,75E-03	7,54E-04	1,52E-03
HF	2,39E-04	5,47E-05	1,35E-04	2,00E-04	4,57E-05	1,03E-04	3,98E-04	1,10E-04	2,71E-04
N ₂ O	7,63E-04	3,61E-04	4,87E-04	8,57E-04	3,93E-04	4,07E-04	2,26E-04	5,93E-05	1,25E-04
NH ₃	4,48E-05	8,92E-06	1,88E-05	3,79E-05	7,92E-06	1,45E-05	7,21E-05	1,71E-05	3,70E-05
NM ₂ VOC	1,56E-02	4,30E-02	9,34E-02	1,57E-02	5,95E-03	6,23E-03	1,34E-02	6,52E-03	6,95E-03
NO _x	7,69E-02	2,24E-02	3,53E-02	5,53E-02	2,35E-02	2,46E-02	4,57E-02	8,33E-03	1,58E-02
SO ₂	9,62E-02	2,14E-02	4,33E-02	7,10E-02	1,99E-02	3,24E-02	1,19E-01	3,30E-02	7,56E-02
Staub	2,87E-02	9,65E-03	1,37E-02	2,90E-02	1,04E-02	1,16E-02	2,37E-02	5,38E-03	1,21E-02

¹⁾ Über Teilprozeßkette "Primäraluminiumherstellung" mittefaßt.

Tabelle E.42: Gesamtbilanz aufgeschlüsselt nach Einzelprozessen der Herstellung und Entsorgung einer Aluminiumrohkarosserie eines Mittelklasse-Pkw, für das Szenario „ungünstig“. Angegeben sind Mittelwert $\langle x \rangle$, Standardabweichung des Mittelwertes m , Standardabweichung s sowie bei Teilprozessketten der mittlere Stichprobenumfang $\langle n \rangle$. (Teil 5)

	Kaltwalzen, Zwischenglühen			Besäumen von Aluminium-Kaltband			Pressen von Aluminiumblech		
	$\langle x \rangle$	m	s	$\langle x \rangle$	m	s	$\langle x \rangle$	m	s
Prozeßwichtung	3,50E+02	2,85E+01	4,95E+01	2,89E+02	3,49E+00	6,42E+00	2,02E+02	0,00E+00	0,00E+00
Energieträger	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ
Steinkohle	2,18E+02	8,07E+01	1,20E+02	4,39E+01	3,16E+01	5,28E+01	2,57E+02	1,25E+02	2,00E+02
Braunkohle	7,33E+01	1,95E+01	3,54E+01	1,48E+01	9,91E+00	1,73E+01	8,63E+01	3,56E+01	6,31E+01
Erdgas	2,13E+02	7,95E+01	8,56E+01	6,84E+01	5,55E+01	7,89E+01	5,62E+01	2,29E+01	3,98E+01
Öl	9,41E+01	2,38E+01	4,18E+01	1,89E+01	1,26E+01	2,19E+01	1,46E+02	1,55E+02	7,82E+01
E_{Prim} aus Uran ¹⁾	3,58E+02	9,00E+01	1,56E+02	7,20E+01	4,80E+01	8,31E+01	4,21E+02	1,70E+02	2,95E+02
Pot. En. Wasser	5,57E+01	1,41E+01	2,43E+01	1,12E+01	7,47E+00	1,29E+01	6,55E+01	2,65E+01	4,59E+01
Materialbedarf	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg
Abbrand	-	-	-	-	-	-	-	-	-
AlF ₃	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alu. primär	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alu. sekundär	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Al. Walzbarren	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Walzb. hom. ²⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alu.-Blech	-	-	-	-2,89E+02	3,49E+00	6,42E+00	2,89E+02	3,49E+00	6,42E+00
Blech gepreßt	-	-	-	-	-	-	-2,02E+02	0,00E+00	0,00E+00
Anode ³⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bauxit	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Brannkalk	-	-	-	-	-	-	-	-	-
H ₂ SiF ₆ ⁴⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kalkstein	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kaltband Al.	-3,50E+02	2,85E+01	4,95E+01	3,50E+02	2,85E+01	4,95E+01	-	-	-
Kar. Alu. ⁴⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kar. ungeht. ⁵⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kieselsäure	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kraetz ⁶⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Legierungen ⁷⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NaOH	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Pech ⁷⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Petrolkoks ⁷⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Roherz	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sand ¹⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Schmelzsalz	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Schrott neu	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-6,10E+01	2,82E+01	4,89E+01	-8,79E+01	3,49E+00	6,42E+00
Shredderschrott	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Steinsalz	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Tonerde	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Walzöl ¹⁾	7,69E-01	7,58E-02	1,31E-01	-	-	-	-	-	-
Warmband Al.	3,50E+02	2,85E+01	4,95E+01	-	-	-	-	-	-
Ausbruch	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cl ₂	-	-	-	-	-	-	-	-	-
H ₂	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Stäube	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Em. in Luft	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg
C ₂ F ₆	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CF ₄	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CH ₄	4,83E-02	1,74E-02	1,30E-02	1,52E-02	1,44E-02	2,08E-02	2,34E-02	1,09E-02	1,80E-02
CO	6,82E-03	1,81E-03	2,67E-03	2,76E-03	2,63E-03	3,64E-03	5,70E-03	2,51E-03	4,19E-03
CO ₂	4,41E+01	1,00E+01	1,60E+01	1,22E+01	1,04E+01	1,48E+01	3,90E+01	1,58E+01	2,74E+01
HCl	5,52E-03	1,53E-03	2,98E-03	1,41E-03	1,14E-03	1,66E-03	6,26E-03	2,64E-03	4,84E-03
HF	5,86E-04	1,97E-04	4,49E-04	1,50E-04	1,24E-04	1,94E-04	6,64E-04	3,08E-04	6,29E-04
N ₂ O	3,76E-04	1,10E-04	2,20E-04	1,21E-04	1,08E-04	1,55E-04	3,77E-04	1,72E-04	3,24E-04
NH ₃	1,06E-04	3,22E-05	6,60E-05	2,72E-05	2,23E-05	3,31E-05	1,20E-04	5,30E-05	1,00E-04
NMVO	2,02E-02	1,03E-02	1,24E-02	5,46E-03	5,59E-03	8,62E-03	2,23E-02	1,37E-02	1,87E-02
NO _x	7,07E-02	1,78E-02	3,33E-02	2,00E-02	1,67E-02	2,39E-02	7,62E-02	3,15E-02	5,67E-02
SO ₂	1,76E-01	5,85E-02	1,27E-01	4,61E-02	3,85E-02	5,86E-02	1,98E-01	9,19E-02	1,81E-01
Staub	3,59E-02	1,03E-02	2,17E-02	9,75E-03	8,12E-03	1,20E-02	3,96E-02	1,72E-02	3,30E-02

Tabelle E.43: Gesamtbilanz aufgeschlüsselt nach Einzelprozessen der Herstellung und Entsorgung einer Aluminiumrohkarosserie eines Mittelklasse-Pkw, für das Szenario „ungünstig“. Angegeben sind Mittelwert $\langle x \rangle$, Standardabweichung des Mittelwertes m , Standardabweichung s sowie bei Teilprozessketten der mittlere Stichprobenumfang $\langle n \rangle$. (Teil 6)

	Fügen einer AluKarosserie			Aushärten			Neuschrottaufbereitung		
	$\langle x \rangle$	m	s	$\langle x \rangle$	m	s	$\langle x \rangle$	m	s
Prozeßwichtung	2,02E+02	0,00E+00	0,00E+00	2,02E+02	0,00E+00	0,00E+00	1,93E+02	2,84E+01	4,93E+01
Energieträger	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ
Steinkohle	7,92E+02	3,05E+02	5,95E+02	-	-	-	1,64E+02	1,13E+02	1,59E+02
Braunkohle	2,66E+02	7,63E+01	1,87E+02	-	-	-	5,50E+01	3,52E+01	5,13E+01
Erdgas	1,74E+02	4,82E+01	1,18E+02	9,00E+02	4,23E+02	4,27E+02	7,59E+02	2,98E+02	4,38E+02
Öl	1,97E+03	9,40E+01	2,31E+02	-	-	-	1,75E+03	4,48E+01	6,44E+01
B _{pot} aus Uran ¹⁾	1,30E+03	3,56E+02	8,71E+02	-	-	-	2,69E+02	1,70E+02	2,44E+02
Pot. En. Wasser	2,02E+02	5,56E+01	1,36E+02	-	-	-	4,18E+01	2,65E+01	3,80E+01
Materialbedarf	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg
Abbrand	-	-	-	-	-	-	-	-	-
AlF ₃	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alu. primär	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alu. sekundär	-	-	-	-	-	-	-1,85E+02	2,72E+01	4,71E+01
Al. Walzbarren	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Walzb. hom. ²⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alu.-Blech	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Blech gepreßt	2,02E+02	0,00E+00	0,00E+00	-	-	-	-	-	-
Anode ³⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bauxit	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Brantkalk	-	-	-	-	-	-	-	-	-
H ₂ SiF ₆ ³⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kalkstein	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kaltband Al.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kar. Alu. ⁴⁾	-	-	-	-2,02E+02	0,00E+00	0,00E+00	-	-	-
Kar. ungeh. ⁵⁾	-2,02E+02	0,00E+00	0,00E+00	2,02E+02	0,00E+00	0,00E+00	-	-	-
Kieselsäure	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kraetze ⁶⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Legierungen ¹⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NaOH	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Pech ⁷⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Petrokok ⁷⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Roherz	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sand ⁷⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Schmelzsatz	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Schrott neu	-	-	-	-	-	-	1,93E+02	2,84E+01	4,93E+01
Shredderschrott	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Steinsalz	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Tonerde	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Walzöl ¹⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Warmband Al.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ausbruch	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cl ₂	-	-	-	-	-	-	-	-	-
H ₂	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Stäube	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Em. in Luft	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg
C ₂ F ₆	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CF ₄	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CH ₄	7,23E-02	2,60E-02	5,35E-02	1,53E-01	8,55E-02	1,13E-01	1,38E-01	5,48E-02	9,47E-02
CO	1,76E-02	5,72E-03	1,24E-02	2,30E-02	1,63E-02	1,63E-02	2,21E-02	1,11E-02	1,31E-02
CO ₂	1,20E+02	3,30E+01	8,09E+01	5,42E+01	2,71E+01	2,71E+01	6,84E+01	1,03E+01	1,78E+01
HCl	1,93E-02	5,80E-03	1,44E-02	3,62E-04	2,56E-04	2,56E-04	4,28E-03	2,48E-03	3,73E-03
HF	2,05E-03	7,30E-04	1,90E-03	3,81E-05	2,69E-05	2,69E-05	4,54E-04	2,75E-04	4,58E-04
N ₂ O	1,16E-03	4,01E-04	9,73E-04	5,80E-04	4,10E-04	4,10E-04	7,06E-04	2,63E-04	3,23E-04
NH ₃	3,71E-04	1,21E-04	3,00E-04	8,21E-06	5,80E-06	5,80E-06	8,32E-05	4,83E-05	7,51E-05
NM _{VOC}	6,88E-02	3,69E-02	5,60E-02	3,35E-02	2,37E-02	2,37E-02	2,06E-02	3,20E-02	6,77E-02
NO _x	2,35E-01	6,78E-02	1,68E-01	4,83E-02	2,90E-02	2,90E-02	8,74E-02	2,35E-02	3,49E-02
SO ₂	6,11E-01	2,18E-01	5,46E-01	3,35E-02	2,03E-02	2,03E-02	1,53E-01	7,68E-02	1,27E-01
Staub	1,22E-01	3,89E-02	9,87E-02	1,51E-02	1,07E-02	1,07E-02	3,73E-02	1,40E-02	2,20E-02

¹⁰⁾ Einzelprozesse "Bauxitabbau", "Bayer-Prozeß", "Natronlauge", "Kalksteinabbau" und "Kalk-Klazinieren" bereits eingefaltet.

Tabelle E.44: Gesamtbilanz aufgeschlüsselt nach Einzelprozessen der Herstellung und Entsorgung einer Aluminiumrohkarosserie eines Mittelklasse-Pkw, für das Szenario „ungünstig“. Angegeben sind Mittelwert $\langle x \rangle$, Standardabweichung des Mittelwertes m , Standardabweichung s sowie bei Teilprozessketten der mittlere Stichprobenumfang $\langle n \rangle$. (Teil 7)

Prozeßschritt Energieträger	TPK Tonerdeherstellung ¹⁰⁾				TPK Primäraluminiumherstellung ¹¹⁾			
	$\langle x \rangle$	m	s	$\langle n \rangle$	$\langle x \rangle$	m	s	$\langle n \rangle$
	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ
Steinkohle	1,91E+03	5,96E+02	1,13E+03	4,11E+00	1,77E+04	4,67E+03	6,58E+03	1,07E+02
Braunkohle	3,55E+02	7,61E+01	1,57E+02	4,11E+00	1,72E+03	2,32E+02	5,41E+02	1,12E+02
Erdgas	1,66E+03	5,53E+02	1,10E+03	4,66E+00	2,38E+03	3,32E+02	6,17E+02	7,49E+01
Öl	7,14E+03	1,14E+03	2,03E+03	4,30E+00	6,89E+03	3,48E+03	1,02E+03	5,20E+01
Erzeugn. aus Uran ¹⁾	1,73E+03	3,54E+02	7,16E+02	4,11E+00	8,16E+03	8,63E+02	1,93E+03	1,12E+02
Pot. En. Wasser	2,70E+02	5,53E+01	1,12E+02	4,11E+00	1,12E+04	1,25E+03	2,72E+03	1,14E+02
Materialbedarf	kg	kg	kg		kg	kg	kg	
Abbrand	-	-	-	0,00E+00	-	-	-	0,00E+00
AlF ₃	-	-	-	0,00E+00	0,00E+00	2,65E+00	5,32E+00	2,50E+00
Alu. primär	-	-	-	0,00E+00	-3,06E+02	0,00E+00	6,85E+01	2,00E+00
Alu. sekundär	-	-	-	0,00E+00	-	-	-	0,00E+00
Al. Walzbarren	-	-	-	0,00E+00	-	-	-	0,00E+00
Walzb. hom. ²⁾	-	-	-	0,00E+00	-	-	-	0,00E+00
Alu.-Blech	-	-	-	0,00E+00	-	-	-	0,00E+00
Blech gepreßt	-	-	-	0,00E+00	-	-	-	0,00E+00
Anode ³⁾	-	-	-	0,00E+00	0,00E+00	2,20E+01	5,24E+01	3,30E+01
Bauxit	1,26E+03	1,41E+02	3,01E+02	9,00E+00	1,09E+01	6,15E+00	7,92E+00	1,00E+00
Brannkalk	-1,98E-01	7,09E+00	1,34E+01	2,00E+00	1,98E-01	1,12E-01	1,44E-01	1,00E+00
H ₂ SiF ₆ ⁴⁾	-	-	-	0,00E+00	5,76E+00	3,25E+00	4,19E+00	1,00E+00
Kalkstein	6,92E+01	9,97E+00	1,88E+01	1,90E+00	-	-	-	0,00E+00
Kaltband Al.	-	-	-	0,00E+00	-	-	-	0,00E+00
Kar. Alu. ⁴⁾	-	-	-	0,00E+00	-	-	-	0,00E+00
Kar. ungeh. ²⁾	-	-	-	0,00E+00	-	-	-	0,00E+00
Kieselsäure	-	-	-	0,00E+00	-3,84E+00	2,17E+00	2,79E+00	1,00E+00
Kraetz ^{5,6)}	-	-	-	0,00E+00	-	-	-	0,00E+00
Legierungen ¹⁾	-	-	-	0,00E+00	-	-	-	0,00E+00
NaOH	-9,51E-01	2,43E+01	5,72E+01	3,49E+00	9,51E-01	5,37E-01	6,91E-01	1,00E+00
Pech ⁷⁾	-	-	-	0,00E+00	3,25E+01	6,38E+00	1,36E+01	4,00E+00
Petrolkoks ⁷⁾	-	-	-	0,00E+00	1,09E+02	1,35E+01	3,10E+01	4,00E+00
Rohherz	-	-	-	-	-	-	-	-
Sand ¹⁾	8,20E-03	4,45E-03	5,76E-03	1,00E+00	-	-	-	0,00E+00
Schmelzsatz	-	-	-	0,00E+00	-	-	-	0,00E+00
Schrott neu	-	-	-	0,00E+00	-	-	-	0,00E+00
Shredderschrott	-	-	-	0,00E+00	-	-	-	0,00E+00
Steinsalz	6,07E+01	1,28E+01	3,00E+01	2,00E+00	-	-	-	0,00E+00
Tonerde	-5,85E+02	0,00E+00	1,31E+02	2,00E+00	5,85E+02	6,34E+01	1,31E+02	5,00E+00
Walzöl ¹⁾	-	-	-	0,00E+00	-	-	-	0,00E+00
Warmband Al.	-	-	-	0,00E+00	-	-	-	0,00E+00
Ausbruch	-	-	-	0,00E+00	-	-	-	0,00E+00
Cl ₂	-3,68E+01	7,74E+00	1,82E+01	2,00E+00	-	-	-	0,00E+00
H ₂	-1,04E+00	2,19E-01	5,13E-01	2,00E+00	-	-	-	0,00E+00
Stäube	-	-	-	0,00E+00	-	-	-	0,00E+00
Em. in Luft	kg	kg	kg		kg	kg	kg	
C ₂ F ₆	-	-	-	0,00E+00	5,05E-02	1,01E-02	1,97E-02	3,00E+00
CF ₄	-	-	-	0,00E+00	2,01E-01	6,96E-02	1,81E-01	5,00E+00
CH ₄	1,33E+00	2,55E-01	6,61E-01	5,58E+00	9,16E-01	1,58E-01	2,82E-01	5,85E+01
CO	3,02E-01	9,62E-02	1,99E-01	5,54E+00	2,80E+01	7,54E+00	2,04E+01	6,44E+00
CO ₂	7,63E+02	7,96E+01	1,94E+02	5,24E+00	2,22E+03	2,40E+02	4,97E+02	8,50E+01
HCl	7,89E-02	3,96E-02	9,20E-02	5,43E+00	3,28E-01	4,96E-02	1,26E-01	1,10E+02
HF	4,03E-03	1,50E-03	3,36E-03	5,25E+00	3,72E-01	1,59E-01	2,68E-02	1,61E+01
N ₂ O	1,15E-02	3,67E-03	5,94E-03	4,41E+00	1,69E-02	2,91E-03	4,89E-03	6,78E+01
NH ₃	4,73E-04	1,32E-04	2,27E-04	5,02E+00	6,21E-03	1,34E-03	3,62E-03	1,12E+02
NMVO	9,76E-01	3,41E-01	6,88E-01	5,34E+00	8,33E-01	2,53E-01	3,28E-01	4,64E+01
NO _x	1,65E+00	2,57E-01	6,98E-01	5,17E+00	3,76E+00	6,68E-01	1,45E+00	8,13E+01
SO ₂	6,02E+00	1,37E+00	3,98E+00	5,34E+00	9,85E+00	1,95E+00	4,78E+00	6,82E+01
Staub	4,09E+00	1,21E+00	2,77E+00	3,25E+00	3,65E+00	1,02E+00	1,61E+00	5,36E+01

¹⁰⁾ Einzelprozesse "Elektrolyse", "Aluminiumfluoridherstellung" und "Anodenherstellung für Al-Elektrolyse" bereits eingefaltet.

Tabelle E.45: Gesamtbilanz aufgeschlüsselt nach Einzelprozessen der Herstellung und Entsorgung einer Aluminiumrohkarosserie eines Mittelklasse-Pkw, für das Szenario „ungünstig“. Angegeben sind Mittelwert $\langle x \rangle$, Standardabweichung des Mittelwertes m , Standardabweichung s sowie bei Teilprozeßketten der mittlere Stichprobenumfang $\langle n \rangle$. (Teil 8)

	$\langle x \rangle$	m	s	$\langle x \rangle$	m	s	$\langle x \rangle$	m	s
Prozeßwichtung	2,64E+02	1,32E+02	1,63E+02				0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Energieträger	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ
Steinkohle	5,34E+01	4,62E+01	6,99E+01	7,31E+00	4,66E+00	4,91E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Braunkohle	1,80E+01	1,48E+01	2,28E+01	2,46E+00	1,43E+00	1,52E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Erdgas	1,17E+01	9,62E+00	1,47E+01	1,60E+00	9,28E-01	9,46E-01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Öl	2,65E+01	2,01E+01	3,00E+01	1,72E+03	4,37E+02	4,73E+02	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
$E_{\text{prim}} \text{ aus Uran}^{1)}$	8,77E+01	7,19E+01	1,09E+02	1,20E+01	6,93E+00	6,96E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Pot. En. Wasser	1,36E+01	1,12E+01	1,70E+01	1,87E+00	1,08E+00	1,08E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Materialbedarf	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg
Abbrand	-	-	-	-	-	-	-	-	-
AlF ₃	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alu. primär	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alu. sekundär	-	-	-	-	-	-	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Al. Walzbarren	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Walzb. hom. ²⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alu.-Blech	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Blech gepreßt	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Anode ³⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bauxit	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Brannkalk	-	-	-	-	-	-	-	-	-
H ₂ SiF ₆ ⁴⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kalkstein	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kaltband Al.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kar. Alu. ⁴⁾	2,02E+02	1,42E+02	1,72E+02	-	-	-	-	-	-
Kar. ungeh. ⁵⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kieselsäure	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Krätze ⁶⁾	-	-	-	-	-	-	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Legierungen ⁷⁾	-	-	-	-	-	-	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
NaOH	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Pech ⁷⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Petrolkoks ⁷⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Roherz	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sand ⁷⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Schmelzsatz	-	-	-	-	-	-	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Schrott neu	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Shredderschrott	-1,71E+02	8,56E+01	1,06E+02	-	-	-	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Steinsalz	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Tonerde	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Walzöl ¹⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Warmband Al.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ausbruch	-	-	-	-	-	-	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Cl ₂	-	-	-	-	-	-	-	-	-
H ₂	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Stäube	-	-	-	-	-	-	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Em. in Luft	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg
C ₂ F ₆	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CF ₄	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CH ₄	5,23E-03	4,27E-03	6,45E-03	1,92E-01	6,03E-02	6,41E-02	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
CO	1,28E-03	1,03E-03	1,54E-03	1,85E-01	8,22E-02	8,38E-02	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
CO ₂	8,39E+00	6,74E+00	1,02E+01	2,57E+02	5,04E+01	5,50E+01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
HCl	1,31E-03	1,08E-03	1,70E-03	3,00E-03	1,93E-03	1,97E-03	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
HF	1,38E-04	1,18E-04	2,01E-04	6,93E-05	2,79E-05	3,08E-05	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
N ₂ O	8,44E-05	6,83E-05	1,10E-04	3,16E-03	1,50E-03	1,98E-03	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
NH ₃	2,51E-05	2,10E-05	3,39E-05	2,96E-05	1,43E-05	1,48E-05	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
NM ₂ VOC	5,26E-03	4,56E-03	6,51E-03	3,51E-01	1,65E-01	1,70E-01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
NO _x	1,66E-02	1,33E-02	2,05E-02	1,33E+00	6,51E-01	6,68E-01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
SO ₂	4,50E-02	3,63E-02	6,00E-02	3,84E+00	9,48E-01	1,38E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Staub	9,13E-03	7,17E-03	1,14E-02	2,11E-01	7,28E-02	7,56E-02	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00

¹²⁾ Wichtung der Transporte über Produkt aus Transportentfernung (siehe Abschnitt 4.2.6) und gewichteter Bedarf im Zielprozeß.

Symbole und Abkürzungen

lateinische Abkürzungen und Symbole

a_i	internes Gut i
$\vec{a}$	Vektor der internen Güter
A	Matrix der internen Güter
a_{ij}	internes Gut i des Prozesses j
a'_{ij}	relative Änderung des internen Gutes i des Prozesses j
b_i	externes Gut i
$\vec{b}$	Vektor der externen Güter
B	Matrix der externen Güter
b_{ij}	externes Gut i des Prozesses j
b'_{ij}	relative Änderung des externen Gutes i des Prozesses j
D_k	Sensitivitätsmatrix des externen Gutes β_k
f, f_i	Funktionssymbol
g_i	Funktionssymbol
ISO	International Standard Organisation
m, m_x	Standardabweichung des Mittelwertes (der Größe x)
p_i	Mengenmultiplikator für Prozeß i
P	Matrix, enthält spaltenweise interne und externe Güter der Prozesse
q	Anzahl Prozesse
r	Anzahl interner Güter
s	Anzahl externer Güter
s, s_x	Standardabweichung (der Größe x)
SETAC	Society Of Environmental Toxicology And Chemistry
$\bar{x}, <x>$	Mittelwert

griechische Abkürzungen und Symbole

α_i	internes Gut i des Kernprozesses
α'_i	relative Änderung des internen Gutes i des Kernprozesses
$\vec{\alpha}$	Vektor der internen Güter des Kernprozesses
β_i	externes Gut i des Kernprozesses, Beitrag der gesamten Prozeßkette
β'_i	relative Änderung des externen Gut i des Kernprozesses
$\vec{\beta}$	Vektor der externen Güter des Kernprozesses, Beiträge der gesamten Prozeßkette
$\Delta\alpha_i$	Änderung des internen Gutes i des Kernprozesses
$\Delta\beta_i$	Änderung des externen Gutes i des Kernprozesses
Δa_{ij}	Änderung des internen Gutes i des Prozesses j
Δb_{ij}	Änderung des externen Gutes i des Prozesses j
ΔP	Zuverlässigkeitsmatrix
$\Delta\beta_i$	Änderung des externen Gutes i des Kernprozesses
δ_x	Streumaß für Größe x
δ_{ij}	Kronecker- δ
Λ	Abbruchkriterium

Literaturverzeichnis

- [1] W. Klöpfer, I. Renner, „Methodik der Wirkungsbilanz im Rahmen von Produkt-Ökobilanzen“, UBA Texte 23/95, Berlin, 1995
- [2] G. Fleischer, persönliche Mitteilung, Berlin, 28.10.97
- [3] Hrsg.: Umweltbundesamt, „Ökobilanzen für Produkte, Bedeutung – Sachstand – Perspektiven“, UBA Texte 38/92, Berlin, 1992
- [4] G. Fleischer, „Zusammenhänge zwischen Zieldefinition und Modellbildung der Sachbilanz (Ökobilanz)“, Vortrag vom 13.05.97 in Aachen
- [5] M. Schmidt, A. Schorb, „Stoffstromanalysen in Ökobilanzen und Öko-Audits“, Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York, 1995
- [6] I. Boustead, „Eco-Profiles of the European Polymer Industry, Report 5: Co-Product Allocation in Chlorine Plants“, Association of Plastics Manufactures in Europe (APME), Brüssel, 1994
- [7] Hrsg.: J. Fava et al., „A Conceptual Framework for Life-Cycle Impact Assessment“, Society of Environmental Toxicology and Chemistry, Workshop Report, Sandestin Florida, 1992
- [8] Leyden Workshop Progresses LCA, SETAC Europe (Hrsg.), Life Cycle Newsletter 2 No. 1, S. 1-2, 1992
- [9] K. Saur, „Life Cycle Interpretation – A Brand New Perspective?“, Int. J. LCA 2 (1), S. 8-10, 1997
- [10] K. Habersatter, „Ökobilanz von Packstoffen, Stand 1990“, Hrsg.: Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern, 1991
- [11] K. Habersatter et al., „Ökoinventare für Verpackungen“, Band 1 und 2, in Hrsg.: Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Schriftenreihe Umwelt Nr. 250/I und Nr. 250/II, Bern, 1996
- [12] R. Frischknecht, P. Kolm, „Modellansatz und Algorithmus zur Berechnung von Ökobilanzen im Rahmen der Datenbank ECOINVENT“, in Hrsg.: M. Schmidt, A. Schorb, „Stoffstromanalysen“, Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York, 1995

- [13] R. Heijungs, „A Generic Method for the Identification of Options for Cleaner Products“, *Ecological Economics* 10, S. 61-81, 1994
- [14] A. Möller, A. Rolf, „Methodische Ansätze zur Erstellung von Stoffstromanalysen unter besonderer Berücksichtigung von Petri-Netzen“, in Hrsg.: M. Schmidt, A. Schorb, „Stoffstromanalysen“, Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York, 1995
- [15] M. Schmidt, „Die Modellierung von Stoffrekursionen in Ökobilanzen“, in Hrsg.: M. Schmidt, A. Schorb, „Stoffstromanalysen“, Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York, 1995
- [16] F. Dinkel, „Imprecision and Uncertainty in LCA“ in Hrsg. S. Schaltegger, „Life Cycle Assessment (LCA) - Quo vadis?“, Birkhäuser Verlag, Basel Boston Berlin, 1996
- [17] F. Dinkel, persönliche Mitteilung, Workshop „Aluminium in Ökobilanzen“ 04./05.12.1997 Bad Honnef
- [18] Die Zeit Nr. 33, 12.08.1994
- [19] Hrsg.: J. Fava et al., „Life-Cycle Impact Assessment Data Quality: Conceptual Framework“, Society of Environmental Toxicology and Chemistry, Workshop Report, Wintergreen USA, 1992
- [20] J.-L. Chevalier, J.-F. Le Teno, „Life Cycle Analysis with Ill-Defined Data and its Application to Building Products“, *Int. J. LCA* 1 (4), 90-96, 1996
- [21] S. I. Gass, „Linear Programming“, Mc Graw-Hill, 4. Auflage, 1982
- [22] M. Walbeck, H.-J. Wagner, D. Martinsen, V. Bundschuh, „Energie und Umwelt als Optimierungsaufgabe“, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 1988
- [23] D. J. Kennedy, D. C. Montgomery, B. H. Quay, „Stochastic Environmental Life Cycle Assessment Modelling“, *Int. J. LCA* 1 (4), S. 199-207, 1996
- [24] J. Topping, „Fehlerrechnung, Eine Einführung für Naturwissenschaftler“, Physik Verlag, Weinheim, 1975
- [25] G. Menges, „Grundriß der Statistik, Teil 1: Theorie“, Westdeutscher Verlag, Opladen, 1972
- [26] K. Stange, „Angewandte Statistik, Erster Teil, Eindimensionale Probleme“, Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York, 1970
- [27] A. C. Aitken, „Statistical Mathematics“, Oliver and Boyd Ltd., Edinburgh, S. 72, 1952
- [28] R. Ludwig, „Methoden der Fehler- und Ausgleichsrechnung“, Vieweg, Braunschweig, 1969

- [29] K. Stange, „Angewandte Statistik, Zweiter Teil, Mehrdimensionale Probleme“, Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York, 1971
- [30] E. Hardtwig, „Fehler- und Ausgleichsrechnung“, B I Hochschultaschenbücher 262/262a, Mannheim, 1968
- [31] J. A. Philipp et. al., „Ökobilanzen für Stahlprodukte - Sachstand und Perspektiven“, Stahl und Eisen 114, Nr.11, 1994
- [32] I. N. Bronstein, K. A. Semenjajew, „Taschenbuch der Mathematik“, 23. Auflage, Verlag Harri Deutsch, Thun und Frankfurt/M., 1987
- [33] R. Frischknecht et. al., „Ökoinventare für Energiesysteme“, ETH Zürich, 2. Auflage, Zürich, März 1995
- [34] W. Volkhausen, Thyssen Stahl, persönliche Mitteilung, 28.01.96
- [35] IKARUS-Datenbank, Fachinformationszentrum Karlsruhe, Version 2.0
- [36] Hrsg.: Verband der Automobilindustrie e.V., „Kraftstoffverbrauch der deutschen Personenkraftwagen Modelljahr 1995“, Stand September 1994, Frankfurt (M)
- [37] F. Quissek in Materialband zum BMBF-Workshop „Werkstoff- und produktionstechnische Potentiale für sparsame, umweltverträgliche und wettbewerbsfähige Kraftfahrzeugkonzepte“, S. 275ff, Bonn, 1997
- [38] Schweimer, Volkswagen AG, telefonische Mitteilung 18.9.1997
- [39] H. Bauer, C. Hoffmann, F. Illmenberger, T. Brunnen, R. Übersperger, T. Fleißner, R. Kawollek, „Kumulierter Energieaufwand und energieoptimierte Nutzungsdauer von Personenkraftwagen“, Bayrisches Zentrum für angewandte Energieforschung e.V. (ZAE), Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Kraftwerkstechnik – TU München, ZAE-Projektnummer 94-250.031, München, April 1995
- [40] H. Franze, Bayerische Motoren-Werke, briefliche Mitteilung 4.2.97
- [41] Dr. R. Winkelgrund, „Automobil-Leichtbau, Mit dem Werkstoff Stahl in die Zukunft“, Stahl-Informationszentrum, Mai 1994, Vortragsmanuskript
- [42] H. Timm, K. Reiter, „Karosseriekonzepte in Aluminium und deren Auswirkungen“, in Hrsg.: VDI, „Entwicklungen im Karosseriebau“, VDI-Bericht 968, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1992
- [43] F.-J. Paetgen, H. Timm, „Aluminium Space Frame - Ein neuer Weg im Pkw-Bau“, in Hrsg.: VDI, „Beiträge der Fahrzeugtechnik zur Verbrauchssenkung“, VDI-Bericht 1099, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1993

- [44] H. Wilps, „Die Erzversorgung der deutschen Stahlindustrie und ihre Auswirkungen auf die Umwelt“, Stahl und Eisen 112, Nr. 5, 1992
- [45] A.-K. Bolbrinker „Stahlfibel“, Hrsg.: Verein Deutscher Eisenhüttenleute, Verlag Stahleisen, Düsseldorf, 1989
- [46] K. Rösener, C. N. A. Siebel, „Strukturwandel im Eisenerzbergbau und auf dem Weltmarkt für Übersee-Erze“, Stahl und Eisen 116, Nr. 1, 1996
- [47] Hrsg.: Wirtschaftsvereinigung Stahl, „Statistisches Jahrbuch der Stahlindustrie 1994“, Verlag Stahleisen, Düsseldorf, 1994
- [48] J. A. Philipp et al., „Recycling in der Stahlindustrie“, Stahl und Eisen 112, Nr. 12, 1992
- [49] O. Rentz, H. Püchert, T. Penkuhn, T. Spengler, „Stoffstrommanagement in der Eisen- und Stahlindustrie“, in Hrsg.: Umweltbundesamt, Bericht 5/96, Erich Schmidt Verlag, Berlin, 1996
- [50] H.-J. Wagner, E. Urošević, „Energieträgeraufteilungen und kumulierte Primärenergieaufwendungen für die Herstellung von ausgewählten Materialien“, Universität-GH Essen, FB12 - Ökologisch verträgliche Energiewirtschaft, Arbeitsbericht, Dezember 1996
- [51] A. F. Holleman, E. Wiberg, „Lehrbuch der Anorganischen Chemie“, 91.-100. Auflage, Verlag Walter de Gruyter, Berlin New York, 1985
- [52] H. M. Aichinger, „Die Energiewirtschaft der Stahlerzeugung“, Vortragsmanuskript im Rahmen des Kontaktstudiums „Metallurgie des Eisens, Teil 2: Stahlerzeugung“, Goslar-Hahnenklee, 1994
- [53] Hrsg.: Verein Deutscher Eisenhüttenleute, „Jahrbuch Stahl 1996“, Band 1, Verlag Stahleisen, Düsseldorf, 1996
- [54] W. Zimnik et al., „Walztechnik und Oberflächenveredlung bei Karosserieblechen“, Stahl und Eisen 115, Nr. 4, 1995
- [55] M. Schuckert, P. Eyerer in Hrsg.: P. Eyerer, „Ganzheitliche Bilanzierung“, S. 361, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1996
- [56] Hrsg.: Preussag Stahl, „Werkstoff Stahl-Herstellung und Verarbeitung“, Firmenschrift, Salzgitter, 1993
- [57] Hrsg.: International Iron and Steel Institute (IISI), „Competition between Steel and Aluminium for the Passenger Car“, Brüssel, 1994
- [58] G. Ahlers-Hestermann, „Stanznieten und Durchsatzfügen für den Leichtbau“, in: Sonderausgabe ATZ und MTZ „Leichtmetalle im Automobilbau 95/96“, 1995

- [59] H. Franze, Bayrische Motorenwerke, persönliche Mitteilung, 14.01.97
- [60] H. Rohn, C. Manstein, C. Liedtke, „Materialintensitätsanalysen von Grund-, Werk- und Baustoffen (2) - Der Werkstoff Aluminium“, Wuppertal Papers Nr. 37, 1995
- [61] D. Altenpohl, „Aluminium von innen“, Aluminium-Verlag, Düsseldorf, 5. Auflage, 1994
- [62] L. Rausch, U. Fritsche et al, „Gesamt-Emissions-Modell Integrierter Systeme (GE-MIS)“, Version 3.0, Hrsg.: Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Jugend, Familie und Gesundheit, Öko-Institut Darmstadt, 1997
- [63] H. Schaefer, W. Mauch, „Kumulierter spezifischer Energieverbrauch von Getränkedosen“, Abschlußbericht, Studie des Lehrstuhls für Energiewirtschaft und Kraftwerkstechnik (IFE) der TU München, München, 1989
- [64] Hrsg.: Alcan Deutschland, „Aluminium - vom Bauxit zum Aluminium“, Firmenschrift, Göttingen, 1988
- [65] S. Schäper, H.-G. Hallwanger, C. Rink, H. Sternau, „Materialrecycling von aluminiumintensiven Altfahrzeugen am Beispiel des Audi A8“, in Hrsg.: Verein Deutscher Ingenieure, „Neue Werkstoffe im Automobilbau“, VDI-Bericht 1235, VDI-Verlag Düsseldorf, 1995
- [66] Hrsg.: Stahl-Informations-Zentrum, „Stahl und Aluminium im Fahrzeugbau“, Düsseldorf, November, 1994
- [67] F. Moussy, P. Bullivant-Clark, F. Robberstad, „Die Aluminium Spaceframe: eine Lösung auch für die Großserie?“, Vortragsmanuskript zur Tagung des Praxis-Forum „Aluminium als Karosseriewerkstoff: Space-Frame-Technologie contra Mischbauweise“, Bad Neuheim, 1995
- [68] DIN-Norm, Hrsg.: Deutsches Institut für Normung, „Ermittlung des Kraftstoffverbrauchs
- [69] Hrsg.: Kraftfahrt-bundesamt, „Emissions-Typprüfwerte von Kraftfahrzeugen“, 6. Ausgabe, Stand April 1996, Personenkraftwagen“, DIN 70 030, Beuth Verlag Berlin,, März 1990
- [70] Angaben des TÜV Rheinland e.V., nicht veröffentlicht
- [71] H. Püchert, A. Walter, P. Conradt, O. Rentz, „Autorecycling“, Economica Verlag, Bonn, 1994
- [72] J. Schmidt, „Automobilrecycling“, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 1995
- [73] R. Winkelgrund, „Stahl-Recycling“, Beitrag für Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, Stahl-Informationszentrum Düsseldorf

- [74] C. Rink, „Aluminium, Automobil und Recycling“, Institut für Kraftfahrwesen, Universität Hannover, Forschungsbericht Nr. 515, 1994
- [75] K. Krone, J. Krüger, H. Orbon, H. W. Sommer, H. Vest, „Ökologische Aspekte der Primär- und Sekundäraluminiumerzeugung in der Bundesrepublik Deutschland“, Metall, 44. Jahrg., Heft 6, 1990
- [76] L. W. Kepplinger, A. Patuzzi, „Die Notwendigkeit des Automobilrecyclings und die Verwendbarkeit des erzeugten Stahls“, Vortragsmanuskript, Hrsg.: Graduiertenkolleg Interdisziplinäre Strategien zum Schutz der Umwelt, RWTH Aachen, 1994
- [77] T. Merten, C. Liedtke, F. Schmidt-Bleek, „Materialintensitätsanalysen von Grund-, Werk-, und Baustoffen (1)“, Hrsg.: Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie, Wuppertal Papers, Nr. 27, 1995
- [78] H. Selzer, H.-H. Rogner, „Energiebedingte Methanemissionen“, in „Energie und Klima, Band 4, Fossile Energieträger“, Hrsg.: Enquete-Kommission „Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre“ des Deutschen Bundestages, Economica Verlag, Karlsruhe, 1990
- [79] Chem Systems International Ltd., „Methane losses from natural gas utilisation“, Statens energiverk 1989, Stockholm, 1989, zitiert in [33]
- [80] A. P. Merenkov, „Environmental problems of the centralized and decentralized energy supply“, Siberian Energy Institute, Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences, Irkutsk, 1991, zitiert in [33]
- [81] Deutsche Wiss. Gesellschaft für Erdöl, Erdgas und Kohle e.V., „Ansatzpunkte und Potentiale zur Minderung des Treibhauseffektes aus Sicht der fossilen Energieträger“, Forschungsbericht 448-2, Hamburg, 1992, zitiert in [33]
- [82] M. B. Korchemkin, „Energy aspects of Perestroika“, Centre for International Energy Studies, Erasmus University Rotterdam, EURICES Paper No. 89/2, Rotterdam, 1989, zitiert in [33]
- [83] H. Pospischill, „Die Methanemissionen der vorgelagerten Kohle- und Erdgasprozeßkette und ihre Bedeutung am Beispiel der Strombereitstellung“, Bericht Nr. 2716, Forschungszentrum Jülich/STE, Jülich, 1993
- [84] I. Bashmakov, „Greenhouse gas emissions inventory of the former Soviet Union: energy related emissions, 1988“, Battelle Memorial Inst., Pacific Northwest Laboratory, Washington D.C., 1992, zitiert in [33]
- [85] A. Arbatov, in Hrsg.: I. Bashmakov, „Prospects for energy related greenhouse gases emissions dynamics in the USSR“, Energy Research Inst., Moskau, 1991, zitiert in [33]

- [86] K. P. Harms (Hrsg.), „Das Buch vom Erdöl“, 5. Auflage, Reuter und Klöckner, Hamburg, 1989
- [87] H. D. Baehr, „Thermodynamik“, 7. Auflage, Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York, 1989
- [88] Vertrauliche Mitteilung einer modernen, westeuropäischen Raffinerie, 1991, zitiert in [33]
- [89] U. Fritsche, L. Rausch, K.-H. Simon, „Gesamt-Emissions-Modell Integrierter Systeme (GEMIS); Umweltwirkungsanalyse von Energiesystemen“, Darmstadt/Kassel, 1989
- [90] Hrsg.: H. Hausen, „Landolt-Börnstein, Zahlenwerte und Funktionen aus Physik, Chemie, Astronomie, Geophysik und Technik, 4. Teil, Bandteil b, Thermodynamische Eigenschaften von Gemischen, Verbrennung, Wärmeübertragung“, 6. Auflage, Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York, 1972, zitiert in [33]
- [91] Vertrauliche Informationen eines modernen, westeuropäischen Kraftwerks, 1993, zitiert in [33]
- [92] Schweizerische Interessensgemeinschaft Feuerungsforschung (SIFF), Arbeitsgruppe Abgasanalytik, „Brennstoffspezifische Kenngrößen für Heizöl EL“, Zürich, 1992, zitiert in [33]
- [93] K. U. Birnbaum, H.-J. Wagner, „Einheitliche Berechnung von CO₂-Emissionen“, in „Energiewirtschaftliche Tagesfragen“, 42. Jahrgang, Heft 1/2, 1992
- [94] Mitteilung des Verbandes der Elektrizitätswerke Österreichs, Wien, 1993, zitiert in [33]
- [95] OECD, „Estimation of Greenhouse Gas Emissions and Sinks“, Paris, 1991, zitiert in [33]
- [96] E.-A. Ratajczak im Auftrag des UBA Berlin, „Emissionsmessungen an kohlegefeuerten Hausbrandfeuerstätten insbesondere im Hinblick auf gesundheitsgefährdende Abgasbestandteile, Band 1-3“, Essen, 1987, zitiert in [33]
- [97] R. Konstantinidis, P. Kieferle, A. Bäder, „Schadstoffbewertung der Heizsysteme“, Band 10 in „Örtliche und regionale Energieversorgungskonzepte“, Bonn, 1986
- [98] U. Fritsche, J. Leuchtner, F. C. Matthes, L. Rausch, K.-H. Simon, „Umweltanalyse von Energie-, Transport- und Stoffsystemen: Gesamt-Emissions-Modell Integrierter Systeme (GEMIS) Version 2.0“, Darmstadt/Kassel, 1992
- [99] U. Torp, Mitteilung, Ministry of the Environment, Kopenhagen, 1991, zitiert in [33]

- [100] Umweltbundesamt, „Luftreinhaltung '88; Tendenzen - Probleme - Lösungen“, Berlin, 1989
- [101] Hrsg.: OECD, „Estimation of Greenhouse Gas Emissions and Sinks“, Final Report from the OECD Experts Meeting, Februar 1991, zitiert in [33]
- [102] A. Liechti, Abteilung Lufthygiene, BUWAL, Mitteilung, Bern, 16. April 1993, zitiert in [33]
- [103] 3 Meßprotokolle von Schweröl-Industriefeuerungen im Kanton Basel-Landschaft, VFWL, 1988, zitiert in [33]
- [104] C. Veldt, A. Bakkum, R. Bouscaren, „Default Emission Factors from stationary Sources (NO_x - VOC including CH₄)“, Part1, CORINAIR Inventory, Commission of the European Community, Brussels, 1992, zitiert in [33]
- [105] N. J. Eyre, „Gaseous Emissions due to Electricity Fuel Cycles in the United Kingdom“, Energy and Environment Paper No. 1, ETSU for the Department of Energy, Oxfordshire, 1990, zitiert in [33]
- [106] Hrsg.: OECD, „Environmental Effects of Electricity Generation“, Paris, 1985, zitiert in [33]
- [107] Hrsg.: DoE, „Energy Technology Characterizations Handbook; Environmental Pollution and Control factors“, Washington, 1983, zitiert in [33]
- [108] F. Korte, „Potential Impact of Petroleum Products on the Environment“, in „Petroleum Meeting“, UNEP Industry Sector Seminar, Vol. 2, S. 475-558, Paris, 1997, zitiert in [33]
- [109] V. Valkovic, „Trace Elements in Petroleum“, Petroleum Publishing Company, Oklahoma, 1978, zitiert in [33]
- [110] A. E. Hackl, W. Vitovec, „Pyrogene N₂O-Emissionen aus stationären Quellen in Österreich“, in ÖChemZ 10, S. 262-264, 1992, zitiert in [33]
- [111] T. Yokoyama, S. Nishinomiya, H. Matsuda, „N₂O Emissions from Fossil Fuel Fired Power Plants“, Environ. Sci. Technol. 25, S. 347-348, 1991, zitiert in [33]
- [112] W. Vitovec, N₂O Emissionen aus pyrogenen Quellen in Österreich“, Dissertation, Technische Universität Wien, Technisch-Naturwissenschaftliche Abteilung, Wien, 1991, zitiert in [33]
- [113] A. N. Hayhurst, A. D. Lawrence, „Emissions of Nitrous Oxide from Combustion“, Progress in Energy and Combustion Science, Vol 18, No. 6, S. 529-552, 1992, zitiert in [33]

- [114] H. Schaefer, „Zur Definition des kumulierten Energieaufwandes (KEA) und seine primärenergetischen Bewertung“, VDI Bericht 1093 „Kumulierte Energie- und Stoffbilanzen – ihre Bedeutung für Ökobilanzen“, VDI Verlag Düsseldorf, 1993
- [115] Hrsg.: R. Pawlek, „Primary Aluminium Smelters and Producers of the World“, Band 2, Hrsg.: J. Nitsche, „Directories of the World Aluminium Industry“, Aluminium Verlag, Düsseldorf, Stand: November 1996
- [116] Metallstatistik 1983-1993, 81. Jahrgang, Metallgesellschaft AG, Frankfurt (M), Word Bureau of Metal Statistics, Ware England
- [117] n.n., „Situation der europäischen Aluminiumindustrie“, Aluminium, 72. Jahrgang, 1996, Seite 11
- [118] U. R. Fritsche, J. Leuchtner, F. C. Matthes, L. Rausch, K.-H. Simon, „Gesamt-Emissions-Modell Integrierter Systeme (GEMIS)“ Version 2.1, Erweiterter Endbericht, Hrsg.: Öko-Institut, Darmstadt Freiburg Berlin Kassel, 1994
- [119] Hrsg.: Verein Deutscher Kohlenimporteure, „Jahresbericht 1996“, Informationsschrift, Hamburg, 1996
- [120] Hrsg.: Wirtschaftsvereinigung Stahl, „Statistisches Jahrbuch der Stahlindustrie 1996“, Verlag Stahleisen, Düsseldorf, 1996
- [121] T. Marheineke, „Ein Hybridansatz zur ganzheitlichen Bilanzierung“ in Hrsg.: Verein Deutscher Ingenieure „Ganzheitliche Betrachtungen im Automobilbau“, VDI-Bericht 1307, Düsseldorf 1996
- [122] M. Schuckert, „Methode der ganzheitlichen Bilanzierung im Automobilbau“ in „Aluminium in Ökobilanzen“ Tagungsband zu Workshop 04./05.12.1997 Bad Honnef, interner Bericht Forschungszentrum Jülich, FZJ-STE-IB 11/97
- [123] H.-J. Wagner et al., „Ermittlung von Emissionsfaktoren zur Herstellung von Materialien“, Hrsg.: Forschungszentrum Jülich, Jül-Spez-525, 1989
- [124] Hrsg.: W. Hufnagel, „Aluminium-Taschenbuch“, Aluminium-Verlag Düsseldorf, 14. Auflage 1983, 3. datenaktualisierter Druck 1988
- [125] Hrsg.: Commission of the European Communities, Directorate-General XVII for Energy, „Realising Energy Saving Potential Through the Recycling of Aluminium Goods“, 1993
- [126] Y.-X. Liu, J. Thonstad, J.-H. Yang, „On the electrocatalysis of doped carbon anodes in aluminium electrolysis“, Aluminium 72. Jhrg. 1996 11
- [127] H. B. Längen, „Roheisenerzeugung im Jahr 2000“, Stahl und Eisen 115, Nr. 3, 1995

- [128] n.n. (International Primary Aluminium Institute), „Energy for Production of Metallurgical Alumina 1994“, Metall, 49. Jahrgang, Nr. 10, S. 637, 1995
- [129] VDI-Richtlinien „Kumulierter Energieaufwand – Begriffe, Definitionen, Berechnungsmethoden“, (VDI 4600), Beuth Verlag, Berlin
- [130] S. Schmitz, H. J. Oels, A. Tiedemann, „Ökobilanzen für Getränkeverpackungen Teil A: Methode zur Berechnung und Bewertung von Ökobilanzen für Verpackungen“, UBA Texte 31/95, Berlin, 1995
- [131] W. Volkhausen, Thyssen Stahl AG, telefonische Mitteilung, 25.07.95
- [132] H. W. Kreutzer, „Bedeutung und Einfluß von Schrott auf die weitere Entwicklung der Stahlerzeugung“, Stahl und Eisen 110, Nr. 5, 1990
- [133] Hrsg.: Audi, „Aluminium-Technologie im Karosseriebau“, Presseinformation, 1993
- [134] H. M. Aichinger, „Kraftstoffverbrauch durch Gewichtseinsparung an Personenfahrzeugen - Bedeutung des Stahls als Leichtbauwerkstoff“, Stahl und Eisen 116, Nr. 6, S. 71ff, 1996
- [135] F. Behr in Materialband zum BMBF-Workshop „Werkstoff- und produktionstechnische Potentiale für sparsame, umweltverträgliche und wettbewerbsfähige Kraftfahrzeugkonzepte“, S. 199ff, Bonn, 1997
- [136] L. von Bogdandy et al., „Die Schmelzreduktion von Eisenerz nach dem Corex-Verfahren im Kraftwirtschaftlichen Verbund.“, Stahl und Eisen 109(1989) Nr. 9, 10 S. 445 ff
- [137] B. Bussmann et al., „Neuere Ergebnisse beim Betrieb der Kokstrockenkühlanlagen der Kokerei August Thyssen“, in Hrsg.: F. Steinmetz, „Kokereitechnik“, Haus der Technik - Vortragsveröffentlichungen Heft 497, Essen 1985, zitiert in [33]
- [138] F. Cappel, „Sintern von Eisenerzen“ in Hrsg.: F. Oeters et al. „Metallurgie, Teil I: Eisenerzeugung“, Band 2, Verlag Stahleisen mbH Düsseldorf 1982
- [139] W. Degner, „Rationeller Energieeinsatz in der Teilefertigung“, VEB Verlag Technik Berlin 1986
- [140] Hrsg.: Gesamtverband der Aluminiumindustrie, „Aluminium und Rotschlamm“, Informationsschrift
- [141] L. Hamm, W. Ramin, „Recycling im Automobilbau - Einfluß auf den Gesamtenergieverbrauch von Alternativ-Werkstoffen“, Automobilindustrie 1/82 S. 43 ff
- [142] K. Knop, H. Kubiak, „Prozeßtechnik und Wirtschaftlichkeit der Stahlerzeugung über Direktreduktion auf Wasserstoffbasis“, Stahl und Eisen 116 (1996) Nr. 11

- [143] W. Krumm, „Mathematische Modellierung und Optimierung der Energieverteilung im integrierten Hüttenwerk“, VDI Fortschrittsberichte, Reihe 6: Energierzeugung Nr. 232, VDI-Verlag Düsseldorf 1989
- [144] K. Kugeler, P.-W. Phlippen, „Energietechnik“, Springer Verlag Berlin Heidelberg New York, 2. Auflage 1993
- [145] Landtag Nordrhein-Westfalen, Drucksache 11/5438, „Reduzierung der durch Kokereien verursachten Umweltbelastungen“, Düsseldorf 1993
- [146] H. B. Lungen, W. Theobald, „Umweltschutz an europäischen Sinteranlagen und Hochöfen“, Stahl und Eisen 111 (1991) Nr.12
- [147] W. Mauch „Kumulierter spezifischer Energieverbrauch von Getränkedosen“, Abfallwirtschaftsjournal 2 (1990), Nr. 1/2
- [148] O. J. Mjåset, „Advanced emission control systems for the aluminium industry“, Aluminium 72. Jhrg 1996 Nr. 11
- [149] R. P. Murray, P. N. Marriott, „Dolomite fluxed pellet production at Whyalla, South Australia“ in Hrsg.: International Iron and Steel Institute, „Seminar on Sinter and Pellets“, Brüssel 8.-9.6.1988
- [150] T. Penkuhn et al., „Reststoffmanagement in der Eisen- und Stahlindustrie“, Müll und Abfall 5/96
- [151] J. A. Philipp, W. Theobald, W. Volkhausen, „Fortschreibung der Ökobilanz für Stahlprodukte“, Stahl und Eisen 116, Nr. 11, 1996
- [152] „Kaiserstuhl setzt Maßstäbe“, RAG Dialog Nr.1, Oktober 1992, Essen 1992, zitiert in [33]
- [153] O. Rentz et al., „Optimal Control Strategies for reducing Emissions from Energy Conversion and Energy Use in all Countries of the European Community“, KfK-PEF 72, Kernforschungszentrum Karlsruhe 1990
- [154] T. Reynolds, „Continuous casting process and design engineering for realistic energy efficiency by hot linking“, Metallurgical Plant and Technology International 4/1992
- [155] N. Sandberg et al., „Production of pellets at LKAB“ in Hrsg.: International Iron and Steel Institute, „Seminar on Sinter and Pellets“, Brüssel 8.-9.6.1988
- [156] K. Schucht, „Umweltschutz als unternehmerische Aufgabe für den Steinkohlebergbau“, Erzmetall 40 (1987) Nr.2, S.77-83, zitiert in [33]
- [157] G. W. Schweimer, M. Schuckert, „Sachbilanz eines Golf“ in Hrsg.: VDI, „Ganzheitliche Betrachtungen im Automobilbau“, VDI-Bericht 1307, VDI-Verlag Düsseldorf 1996

- [158] T. Spittel et al., „Rationeller Energieeinsatz bei Umformprozessen“, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1981
- [159] R. Weber et al., „Alternative Stahlerzeugungsverfahren“, Stahl und Eisen 110, Nr. 12, 1990
- [160] D. Ziegenbalg, „Moderne Sinterbandentstaubung als Beispiel für integrierten Umweltschutz in Hrsg: Umweltbundesamt, „Moderne Techniken einer umweltfreundlichen Metallindustrie“, UBA Texte 39/93 1993
- [161] A. Ziegler, „Forschungsschwerpunkte im deutschen Steinkohlebergbau“, Energie-wirtschaftliche Tagesfragen 39. Jhrg. (1989) Heft 1/2

Forschungszentrum Jülich



Jül-3657
Mai 1999
ISSN 0944-2952