

Sachbilanz des Golf A4

Georg W. Schweimer

Forschung Umwelt und Verkehr, Volkswagen AG, Wolfsburg

Marcel Levin

Wissenschaftliches Zentrum für Umweltsystemforschung, Gesamthochschule Kassel

Zusammenfassung

Die Bilanz der Herstellung des Golf richtet sich nach der Entwicklungsstückliste. Daten zur Herstellung der großen Teile werden explizit ermittelt, viele Kleinteile aus gleichem Werkstoff und ähnlicher Technologie werden zusammengefasst und auf Kilogramm-basis bilanziert. Der Bilanzrahmen ist eng gesteckt, es werden nur die direkten Herstellungsprozesse für die Rohstoffe, das Produkt "Auto", dessen Betrieb und Verwertung berücksichtigt, aber nicht die Herstellung von erforderlichen Fabriken und Infrastrukturen. Besondere Aufmerksamkeit bei dieser Bilanz gilt den Abwasser- und Abfallströmen in Wolfsburg, sowie der mechanischen Bearbeitung des Motors in Salzgitter und des Getriebes in Kassel. Es wird erstmals ein Otto- und ein Diesel-Motor in ansonsten gleichem Fahrzeug verglichen.

Der Energieaufwand in der Herstellungsphase des Fahrzeuges stammt überwiegend aus der Produktion der Werkstoffe und liegt damit außerhalb der Automobilfabriken. Metallische Emissionen in Luft und Wasser dominieren bei der Gewinnung der Rohstoffe und Herstellung der Werkstoffe. Es werden mehr Kohlenwasserstoffe und Schwefeldioxid bei der Herstellung und Verteilung des Kraftstoffes emittiert, als in der späteren Nutzungsphase.

Während der Nutzungsphase dominiert der Energiebedarf (Kraftstoffverbrauch) und entsprechend die CO₂ Emission, etwa 77% vom Gesamtwert. Aufwand und Abfälle bei Pflege und Wartung werden angegeben.

Die Verwertung von Altfahrzeugen befindet sich im Umbruch. Die politischen Randbedingungen sind inzwischen klar. Wie der Golf in 10 oder 12 Jahren verwertet wird, ist jedoch noch unklar, weil die Demontage und Verwertung erst aufgebaut werden.

Im Vergleich zum Golf A3, (8,1 l Benzin / 100 km) und Lupo 3L TDI, (3,0 l Diesel / 100 km), ergeben sich folgende Änderungen in der Sachbilanz über den gesamten Lebenszyklus:

Stoff / Energie	Golf A4	Golf A4	Golf A3	Lupo 3L	Hauptgrund / Ursache (A4 / A3)
	Diesel	Otto	Otto	Diesel	
Leergewicht	1181 kg	1059 kg	1025 kg	800	Größeres Fahrzeug
Primärenergie (Herst.-Nutz.-Verwert.)	113 MWh	124 MWh	150 MWh	70 MWh	Niedriger Verbrauch 4,9 und 6,5 statt 8,1 l/100 km
Stahl	722 kg	634 kg	650 kg	410 kg	Schweres Fahrzeug
Kunststoffe, Gummi	249 kg	228 kg	170 kg	130 kg	
Aluminium	50 kg	52 kg	30 kg	130 kg	Leichtbau beim Lupo 3L TDI
CO ₂ Emission	27 tn	30 tn	36 tn	16 tn	Niedrigerer Verbrauch
HC Emissionen	60 kg	108 kg	160 kg	40 kg	Geringe Umfüllverluste beim Diesel
SO ₂ Emission	29 kg	30 kg	34 kg	20 kg	Niedrigerer Verbrauch
NO _x Emissionen	77 kg	24 kg	26 kg	51 kg	Kein NO _x -Kat für Diesel
Staub/Partikel Emission	15 kg	10 kg	8 kg	10 kg	Davon 5/0,4/2/3 kg aus Motorabgas

Der technische Fortschritt zeigt eine Abnahme der Emissionen in Luft und Wasser über den gesamten Lebenszyklus, die mit einem steigenden Aufwand in der Herstellungsphase erreicht wird. Die Bilanzergebnisse sind, trotz wesentlich verfeinerter Bilanzierungstechnik, unerwartet stabil.

Inhalt

1	Einleitung	3
2	Bilanzierungsmethode	3
2.1	Allgemeine Angaben	5
2.2	Methode und Begriffe	5
2.3	Software	8
3	Planstruktur	9
3.1	Produktion	9
3.2	Nutzungsphase	12
3.3	Verwertung	13
4	Datenerhebung	14
4.1	Allgemeine Daten	14
4.2	Mechanische Bearbeitung des Motors im Werk Salzgitter	15
4.3	Getriebeherstellung im Werk Kassel	17
4.4	Energieversorgung im Werk Wolfsburg	17
4.5	Abwasser und Abfall im Werk Wolfsburg	18
4.6	Zulieferer	23
4.7	Nutzungsphase	23
5	Ergebnisse	24
5.1	Allgemeine Ergebnisse	24
5.2	Mechanische Bearbeitung des Rumpfmotors im Werk Salzgitter	30
5.3	Getriebefertigung im Werk Kassel	30
6	Diskussion der Ergebnisse	31
	Abkürzungen	34
	Schrifttum	35
	Anhänge	
1	Technische Beschreibung Golf A4, 4 Türen, 1.4 l 55 kW Otto-Motor	36
	Technische Beschreibung Golf A4, 4 Türen, 1.9 l 66 kW TDI-Motor	37
2	Wirkungspotentiale	
	Versauerungspotential	38
	Treibhauseffekt	38

1 Einleitung

Volkswagen hat mit der umweltmäßigen Bilanzierung ganzer Pkw's im Jahre 1992 begonnen. Damals war der Golf A3 das Volumen-Modell des Konzerns und wurde deshalb als Bilanz-Objekt ausgewählt. Das große öffentliche Interesse an dieser Sachbilanz [1, 2] und an den darauf folgenden Bilanzen des 3 Liter Lupo [3] und des SEAT Ibiza [4] ist ein Ansporn, den aktuellen Golf A4 zu betrachten.

Die Umweltbilanz beschränkt sich auf die Sachbilanz. Auf eine ökologische Wirkungsabschätzung wird noch verzichtet, da z.Z. nicht genügend Daten zur Abschätzung von zeitlichen und lokalen Wirkungen verfügbar sind, darunter die Entstehungsorte und Einwirkungsdauer vieler Emissionen.

Ein Vergleich mit anderen Fahrzeugen ist nur bedingt möglich, weil sich die Fahrzeuge immer unterscheiden und die Bilanzen im Laufe der Zeit immer vollständiger werden. Die umweltmäßigen Auswirkungen der Motorisierung, 66 kW Diesel TDI und 55 kW Otto-Motor, werden hier erstmalig gezeigt.

In die vorliegende Arbeit sind neue Angaben von externen Lieferanten und die Ergebnisse der Diplomarbeiten von Bambl [5], Wolfram [6] und Levin [7] eingegangen. Sie stellt den Stand vom 31 Juli 2000 dar.

2 Bilanzierungsmethode

Die Ökobilanz (LCA) wird nach den internationalen Standards ISO 14040/41 [8, 9] erstellt. Darin vorkommende Begriffe sind *kursiv* gekennzeichnet.

Die Ökobilanz eines Produktes enthält die 3 Abschnitte:

Sachbilanz, in der möglichst alle benötigten Stoffarten und -mengen, sowie die eingesetzten Energiearten und -mengen für die Herstellung, Nutzung und Verwertung eines Produktes registriert werden. Die Herstellung des Produktes schließt die Gewinnung der Rohstoffe und deren Weiterverarbeitung ein. Weil für die Herstellung, Nutzung und Verwertung zusätzliche Produkte und Anlagen erforderlich sind, muss eine Grenze vereinbart werden. Diese Grenze legt fest, was dem betrachteten Produkt noch zugerechnet wird und was nicht. Sie wird mit *Systemgrenze* oder Bilanzrahmen bezeichnet.

Wirkungsabschätzung, in der Umwelteinflusskategorien vereinbart werden, darunter Treibhauseffekt, Bodenversauerung, Bodeneutrophierung (Überdüngung), Bodenversiegelung, etc. Zusätzlich werden den in der Sachbilanz registrierten Stoffe Wirkungspotentiale (bezogen auf eine Leitsubstanz) zugeordnet. Die Summe der Produkte von Wirkungspotential x Stoffmenge liefert die potentielle Umweltwirkung des betrachteten Industrieproduktes in der jeweiligen Umweltkategorie.

Auswertung, in der mit mehr oder weniger subjektiven Kriterien, d.h. Bewertungsfaktoren, die aus der Wirkungsabschätzung erhaltenen einzelnen potentiellen Umweltwirkungen relativ zu einander bewertet werden, um Schlussfolgerungen und Empfehlungen zu geben. Hier können auch verschiedene Industrieprodukte hinsichtlich ihrer potentiellen Umweltwirkungen verglichen werden.

Die ISO 14040 schreibt eine *kritische Prüfung durch unabhängige Sachverständige* vor, weil bei der Vielzahl von Stoff- und Energieflüssen sich häufig grobe Zahlenfehler einschleichen, insbesondere bei selten erfassten Emissionen. Auf diesen *peer review* wird hier aus Kosten- und Termingründen verzichtet.

Die Daten für die 3 Abschnitte einer Ökobilanz (Sachbilanz, Wirkungsabschätzung und Auswertung) kommen aus ganz verschiedenen Bereichen der Gesellschaft, Bild 1.

Naturwissenschaftler betrachten die Auswirkung von Stoffen in der Atmosphäre auf das Klima, sowie die Auswirkung von Stoffen im Wasser und Boden auf die Biosphäre. Sie definieren Begriffe wie Treibhauseffekt, Ozonloch, Bodenversauerung, -eutrophierung, -versiegelung. Um diesen Begriffen messbare Größen zuzuordnen, werden Potentiale in Relation zu Referenzstoffen definiert. Einige Beispiele sind:

IPCC Treibhauspotential (100 Jahre) von

1 kg Lachgas (N_2O) = 320 kg CO_2 äquiv.,

1 kg Methan (CH_4) = 24,5 kg CO_2 äquiv.

CML Ozonabbaupotential in der Stratosphäre von

1 kg Tetra Chlor Kohlenstoff (CCl_4) = 1,15 kg $\text{R11}_{\text{äquiv.}}$ (CCl_3F)

CML Bodenversauerungspotential von

1 kg Sickoxid (NO_2) = 0,7 kg SO_2 äquiv.

Diese Potentiale sind dimensionslose Verhältniszahlen zur Umrechnung der Masse eines Stoffes, z.B. N_2O , in die Masse der Referenzsubstanz, z.B. CO_2 . Der Sinn dieser Potentiale ist erstens, gewichtete Summen von Stoffen bilden zu können, die in einer definierten Umweltkategorie wirken, z.B. Treibhauseffekt gemessen in kg CO_2 äquiv. und zweitens, eine einfache Einschätzung eines Stoffes zu ermöglichen, z.B. 1 kg N_2O ist treibhausmäßig äquivalent zu 320 kg CO_2 .

Die Bestimmung der Potentiale ist teilweise einfach, z.B. bei der Bodenversauerung und -eutrophierung gehen nur chemische Valenzen und Molarmassen ein. Die Bestimmung kann aber auch schwierig sein, z.B. das Treibhauspotential, das ein globales Klimamodell erfordert. Für eine einfache Abschätzung des Treibhauseffektes siehe Anhang 2.

Die Daten für die Sachbilanz werden von den Produzenten von Werkstoffen und Produkten, d.h. von der Industrie bestimmt. Es sind die Ressourcen und Emissionen. "Ingenieure" entwerfen Werkstoffe, Produkte, Fabriken, und kennen deshalb die erforderlichen Ressourcen und die entstehenden Emissionen. Bestimmung dieser Daten ist keine Aufgabe der Naturwissenschaftler.

Daten für die Bewertung kommen aus der Politik. Mit ihnen werden Vergleiche gemacht, die auf naturwissenschaftlicher Basis nicht möglich sind, z.B. der in Kauf genommene Mehrverbrauch eines Pkw zugunsten niedrigerer Schadstoffemissionen mit Hilfe eines Katalysators.

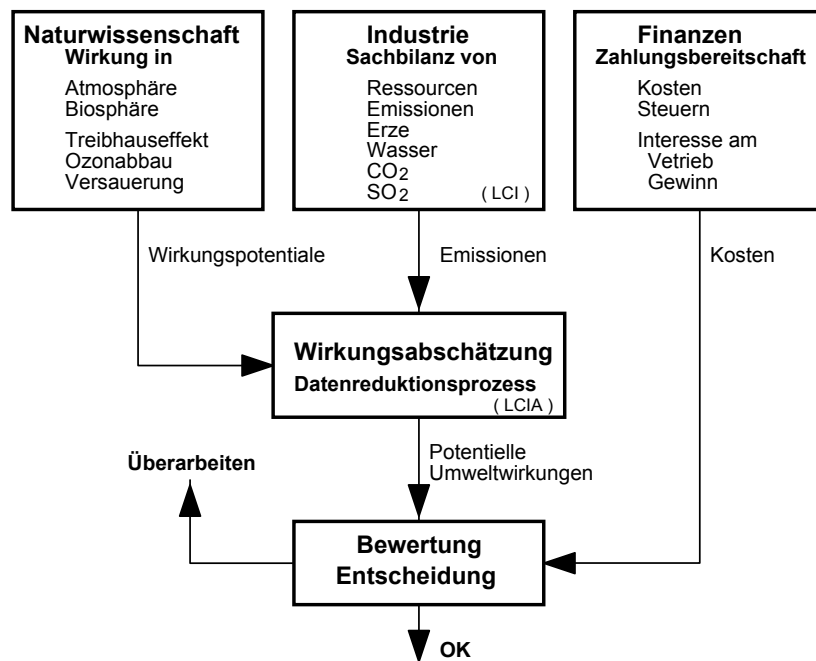


Bild 1: Datenquellen und -flüsse in einer Ökobilanz. Der wesentliche Aufwand besteht in der Datenerhebung. Die Wirkungsabschätzung, Bewertung und Entscheidung gehen schnell.

Wissend, dass die Ökobilanz eines Autos sehr aufwendig ist, soll zunächst nur eine Sachbilanz durchgeführt werden.

Der Autor ist bemüht, eine möglichst detaillierte Studie mit größtmöglicher Datentiefe zu erstellen. Dabei zeigt sich sehr schnell, dass in einigen Bereichen die Datenmenge den Rahmen der Studie sprengen kann, in anderen auf *Ersatzdaten* von älteren Modellen zurückgegriffen werden muss.

2.1 Allgemeine Angaben

Das Bilanzobjekt, d.h. die *funktionelle Einheit*, ist der Golf A4, Modelljahr 1999, 4 Türen, 1.4 Liter, 55 kW Ottomotor oder 1.9 Liter, 66 kW TDI Dieselmotor mit 5-Gang Schaltgetriebe, dessen Eigenschaften und Merkmale in der Produktbeschreibung enthalten sind. Einige dieser Merkmale sind in Anhang 1 erwähnt.

In der vorliegenden Veröffentlichung wird auf die Darstellung vieler Details, insbesondere auf umfangreiche Prozesspläne und Stücklisten verzichtet.

Der Bilanzrahmen, d.h. die *Systemgrenze*, ist eng gesteckt, es werden nur die dem Produkt "Auto" direkt zugeordneten Prozesse berücksichtigt. Darin enthalten sind die Vorproduktketten und die Fertigung des Endproduktes, jedoch keine Herstellung von Anlagen. Bild 2 veranschaulicht dieses Konzept.

Der *Detaillierungsgrad* ist innerhalb der VW-Werke am höchsten, es werden Einzelteile, die mindestens 1 g wiegen, berücksichtigt. Tabellen für die Werkstoffherstellung und Stromerzeugung werden in der Form von fertigen Modulen in getrennten Projekten erstellt. Nicht limitierte Bestandteile im Motorabgas werden möglichst bis zur messtechnischen Nachweisgrenze berücksichtigt.

	Werkzeuge Fabriken	Produkt Auto	Betriebsstoffe Benzin/Diesel/Öl	Infrastruktur Straßen
Verwaltung				
Planung				
F & E			Prospektion	
Rohstoffe		Werkstoffe	Rohöl	
Produktion		Zulieferer VW-Werke	Raffinerie Verteilung	
Nutzung		Wartung	Benzin/Diesel Verbrennung	
Verwertung		Shredder	Altöl	
Deponie				

Bild 2: Der Bilanzrahmen. In jedem Tabellenfeld werden Energie und Ressourcen verbraucht, es entstehen Emissionen in Luft und Wasser, sowie Abfälle.
In der Sachbilanz werden nur die hervorgehobenen Felder berücksichtigt.

Die Aufteilung (*Allokation*) von Ein- und Ausgangsströmen (*Ressourcen* und *Emissionen*) bei der *Koppelproduktion* wird fallweise unterschiedlich durchgeführt. In der Raffinerie und im Automobilwerk wird nach Masse aufgeteilt. In die Werkstoffe gehen nur die tatsächlich eingesetzten Ressourcen ein, d.h. bei Sekundärwerkstoffen wird nur der Recyclingaufwand, aber keine Aufwendungen aus einer früheren Gewinnung des Primärwerkstoffes berücksichtigt.

2.2 Methode und Begriffe

Zunächst werden Pläne erstellt, deren Elemente Prozesse und Unterpläne sind. Der oberste Plan, Bild 3, stellt die Technosphäre dar. Sie ist in die Umwelt eingebettet. Die Pläne werden weiter unterteilt und bis zu den Prozessen herunter gebrochen. Es ergibt sich ein Planverzeichnis, ganz analog zum Verzeichnis von Dateien in modernen IT-Anlagen. Ein Plan entspricht einem Verzeichnis, der Prozess einer Datei. Bild 4 zeigt einen Ausschnitt aus dem Planverzeichnis. Das gesamte Planverzeichnis wird hier nicht dargestellt, es ergibt sich aus dem vollständigen Satz der Pläne.

Das Konzept der Pläne, Module und Prozesse ermöglicht eine Strukturierung der Arbeit. Module können unabhängig von anderen erstellt werden. Auch die von einigen Unternehmen gewünschte Vertraulichkeit der Prozesse lässt sich wahren, indem deren Teilbilanz in einem Modul zusammen gefasst und nur dieses weitergegeben wird.

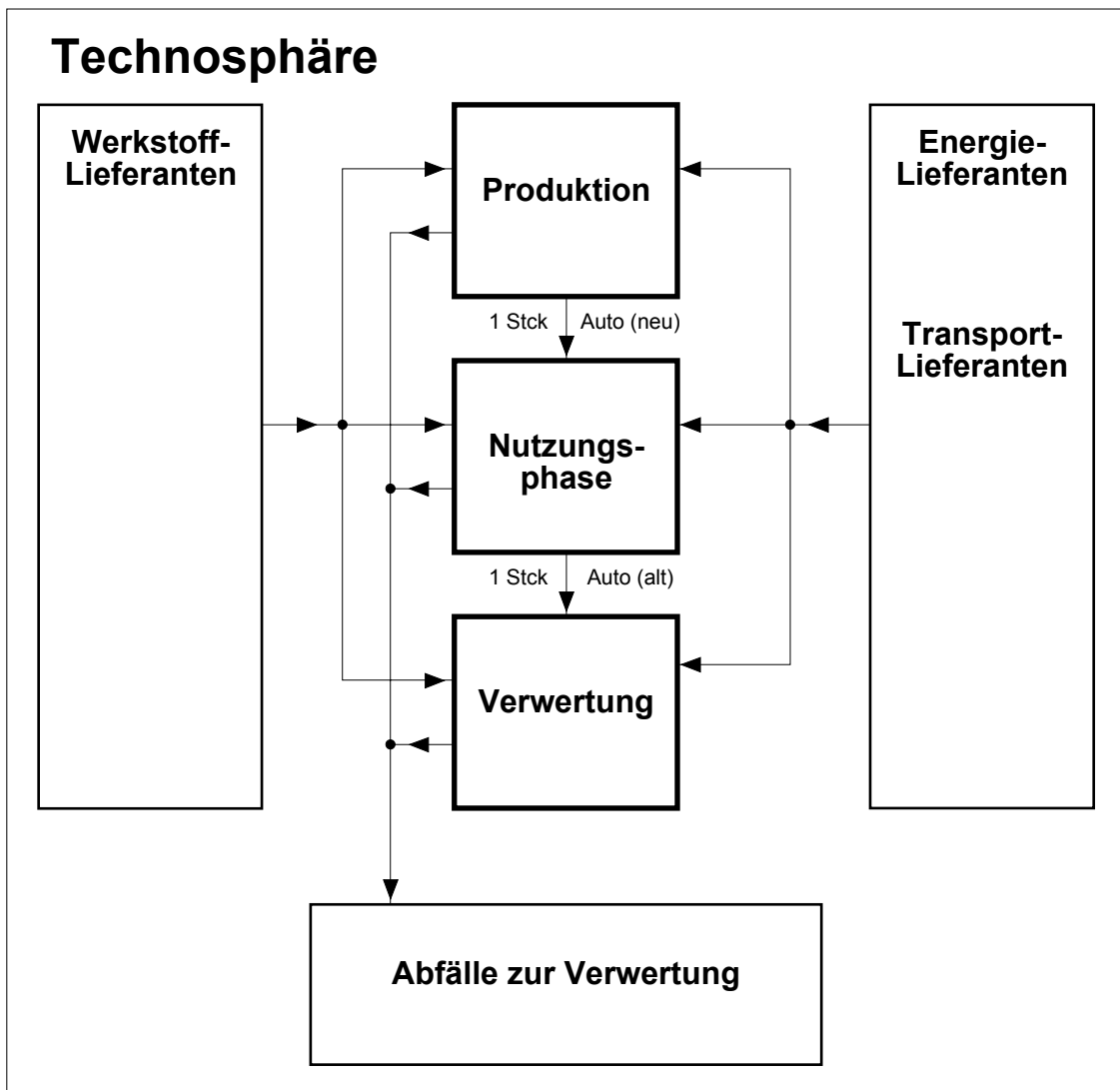


Bild 3: Schema des obersten Bilanzplans. Der Plan "Produktion" enthält alle Prozesse zur Herstellung des Pkw. Die "Nutzungsphase" enthält den Pkw-Betrieb, einschließlich Pflege und Wartung. Die "Verwertung" beinhaltet die Zerlegung des Altautos, Teileverkauf und Shreddern. In den Bereichen Werkstoff- und Energie-Lieferanten befinden sich Prozesse, die bis zu den Ressourcen/Emissionen konsolidiert sind. Stoffflüsse in Unterplänen, die kein Quelle/ Senke-Paar innerhalb des Plans haben, überschreiten die Plangrenze und landen damit im nächsthöheren Plan. Dazu gehören auch Sekundär-Werkstoffe aus dem Bereich "Abfälle zur Verwertung", sowie Sekundär-Werkstoffe, die im Bereich "Werkstofflieferanten" benötigt werden.

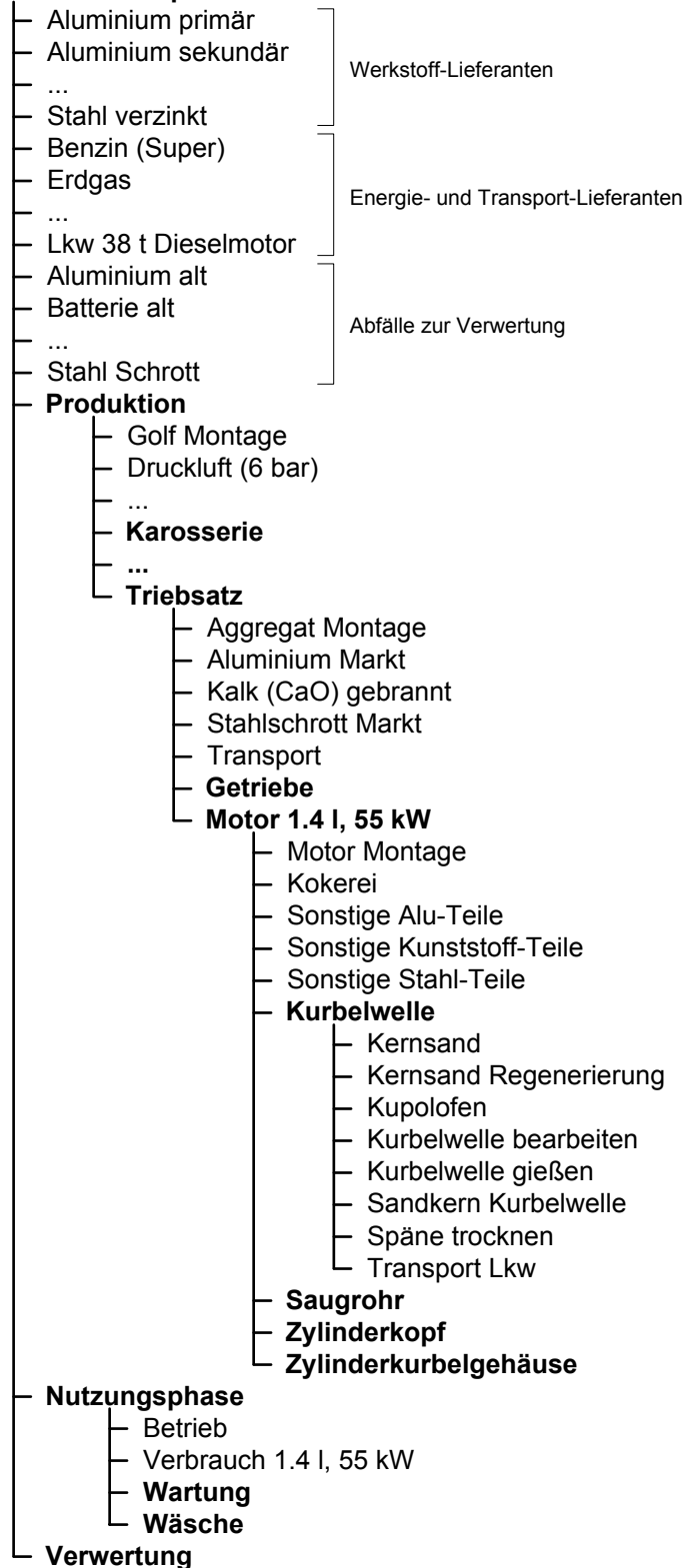
Golf A4: Technosphäre

Bild 4: Ausschnitt aus dem Verzeichnis "Golf A4: Technosphäre" zur Verwaltung der Pläne, Module und Basis-Prozesse. Detailliert dargestellt ist der Pfad zur Herstellung der Kurbelwelle. Pläne sind fett gedruckt, Module und Basis-Prozesse befinden sich am Ende der Pfade. Die Plan-Bilanz liefert eine Tabelle mit Zu- und Abflüssen von Produkten, bezogen auf ein ausgewähltes Produkt, z.B. 1 Stck "Golf".

Zum Schluss seien hier noch einige IT-technische Definitionen [10] gegeben, ohne Anspruch auf Vollständigkeit.

Plan: Stellt die Verknüpfung der Prozesse bildlich dar. Ein Plan muss mindestens 2 miteinander verbundene Objekte (Plan, Modul oder Basis-Prozess) enthalten, isoliert stehende Objekte oder Objektgruppen sind nicht erlaubt. Pläne sind hierarchisch strukturiert, wie Verzeichnisse und Dateien. Die im Plan enthaltenen Objekte werden durch Rechtecke mit Namen symbolisiert. Pläne enthalten keine Daten über Stoffmengen, sondern die Verbindungen, symbolisiert durch Linien mit Richtungspfeil, zwischen den Ein- und Ausgängen der im Plan enthaltenen Objekte.

Basis-Prozess: Tabelle mit quantifizierten Ein- und Ausgangsprodukten. Die Stoff- und Energiemengen werden hier eingegeben. Physikalische Gesetze, wie Masse- und Energieerhaltung, sollten bei der Umformung von Ein- zu Ausgangsprodukten eingehalten werden, müssen es aber nicht. Die Bezeichnung "Basis" besagt, dass die Tabelle der Ein- und Ausgangsprodukte auf ein Referenz-Produkt bezogen ist, dessen numerischer Wert sinnvollerweise = 1 gesetzt wird. Basis-Prozesse werden in den Plänen durch nicht-fette Rechtecke symbolisiert. Die Tabellenwerte der verbundenen Produkte werden innerhalb der Rechtecke eingetragen. Ein Basis-Prozess ist, mathematisch gesehen, ein Vektor.

Modul: Basis-Prozess in einer Datenbank mit globaler Gültigkeit, d.h. er kann mit mehreren Plänen gleichzeitig verknüpft sein. Er wird in Plänen wie ein Basis-Prozess symbolisiert.

Skalierungsfaktor: Zahl, mit der eine Tabelle (Basis-Prozess) multipliziert wird, damit die Liefermenge (Quelle) eines Prozesses mit der Annahmemenge (Senke) des anderen Prozesses übereinstimmt. Jeder Prozess hat seinen eigenen Skalierungsfaktor. Die Skalierungsfaktoren werden mit der Plan-Bilanzierung berechnet, aber nicht explizit im Plan eingetragen. Sein Zahlenwert ist ersichtlich aus dem Verhältnis von äußerer (Fluss) zur inneren (Basis) Zahl.

Verbindung: Leitung, durch die ein definiertes Produkt von einem Ausgang zu einem Eingang fließt. Die Produktmenge bleibt entlang einer Verbindung erhalten, d.h. es fließt genau so viel in die Verbindung, wie am anderen Ende wieder herauskommt. Der Fluss (Name, Menge und Einheit) wird an das Verbindungssymbol (Linie) geschrieben. Der Skalierungsfaktor ist dann aus dem Verhältnis von Flussmenge zu Tabellenwert (äußere zu innere Zahl) ersichtlich.

Knoten: Treffpunkt mehrerer Verbindungen für das gleiche Produkt. Der Verteilerknoten hat einen Eingang und mehrere Ausgänge. Der Sammelknoten hat mehrere Eingänge und einen Ausgang. Allgemeine Knoten können aus Verteiler- und Sammelknoten gebildet werden. Es gibt Systemknoten, symbolisiert durch einen ausgefüllten Punkt, deren Bilanz vom System (Rechner) bestimmt wird, und benutzerdefinierte Knoten, symbolisiert durch einen nicht gefüllten Kreis, bei denen der Benutzer die Verhältnisse zwischen den einzelnen Verbindungen explizit als Daten einsetzt.

Bilanz: Vektorielle Summe der skalierten Prozesse und Unterpläne in einem Plan. Flüsse, die eine Quelle und eine Senke im Plan haben, erscheinen nicht in der Bilanz. Die Bilanz des obersten Plans ist die Sachbilanz.

2.3 Software

Für die Datenerhebung und Erstellung der Basisprozesse wird das Microsoft Produkt EXCEL 5.0 verwendet. Die Basisprozesse werden anschließend ins Bilanzierungsprogramm importiert.

Die meisten Daten zur Herstellung von Werkstoffen wurden der Datenbank GaBi [11] entnommen und in eine eigene spezielle Datenbank integriert. Damit wurden viele Bezeichnungen systematisch vereinheitlicht und diverse Daten aktualisiert. Die Bilanzierung selbst wird mit dem Programm TEAM [12] durchgeführt, weil dieses für die unumgänglichen Korrekturarbeiten bei der Erstellung der Gesamtbilanz wesentlich schneller ist und eine besonders sorgfältige Prüfung auf Formalfehler durchführt.

3 Planstruktur

Der Lebenslauf eines Produktes "von der Wiege bis zur Bahre" ist sehr komplex. Der Aufwand zur Darstellung aller beteiligten Prozesse ist endlos. Deshalb werden zwangsweise Prozessgruppen zusammengefasst, insbesondere solche, die relativ weit von der funktionalen Einheit entfernt sind.

Die Gruppierung der Prozesse ist je nach Ziel der Bilanz unterschiedlich. Wenn z.B. der ökologische Rucksack von jedem einzelnen Bauteil eines Autos dargestellt werden soll, dann müssen Duplikate der Prozesse für die benötigten Werkstoffe, Energien und Transporte an jedes Einzelteil gehängt werden. Die Bilanz liefert dann direkt den Ressourcen-Bedarf und die Emissionen für das Einzelteil. Falls die Bilanz des gesamten Autos im Vordergrund steht, genügt es, den jeweiligen Werkstoff-, Energie- und Transportbedarf an einen im obersten Plan befindlichen Lieferanten weiter zu leiten. Die Bilanz liefert dann interessante Summen von Zwischenprodukten, darunter die gesamte Transportleistung mit zugehörigem Kraftstoffverbrauch und den gesamten elektrischen Strom.

Schließlich baut ein Bilanzierer den Bilanzplan entsprechend seiner Kenntnis über Fertigungsstrukturen auf, z.B. Gruppierung nach VW-Werken [1] oder nach den Entwicklungsstücklisten [3]. Die Struktur der Stückliste hat den Vorteil, dass sie beliebig erweiterbar ist, denn dort, wo eine Stückliste mit einem Zusammenbau (ZSB) endet, beginnt die Stückliste des Zulieferers.

Der oberste Plan wird nach dem Schema von Bild 3 aufgebaut und ist in Bild 5 dargestellt. Er zeigt bereits wesentliche Bilanzergebnisse, insbesondere die Mengen der technischen Flüsse, aber weder Ressourcen noch Emissionen. Der Plan zeigt nicht die Gesamtmenge einiger technischer Flüsse, darunter Erdgas, Strom und Transport, weil die Werkstoff-Module fast vollständig bis auf die Ressourcen konsolidiert sind. Es befinden sich auch nicht alle Werkstoff-Module im obersten Plan, weil verfeinerte Werkstoffe, z.B. Edelstahl, in die "Produktion" gehören.

Entgegen üblicher Bilanzierungspraxis werden Transportleistungen hier wie eine börsenfähige Ware behandelt. Transportleistungen werden an vielen Stellen angefordert, ähnlich wie elektrischer Strom. Die Transportanforderungen werden getrennt nach Transporttyp gesammelt. Der Motor des Transportmediums benötigt Ressourcen und verursacht Emissionen. Die Bezugsgröße der Motorprozesse ist der Kraftstoff, womit besonders anschaulich dargestellt wird, wie viele Tonnen-Kilometer mit einem kg Kraftstoff transportiert werden können. Dabei wird eine typische Auslastung vorausgesetzt. Die Sammlung aller Transportanforderungen hat noch einen anderen Effekt: Es wird deutlich, wie wenig Kraftstoff (und Emissionen) hier benötigt wird.

3.1 Produktion

Der Bilanzplan "Produktion", Bild 6, ist ähnlich aufgebaut wie die Entwicklungsstückliste. Da dieser Plan nicht den Anspruch auf Vollständigkeit erhebt, wie die Stückliste, wurden, zwecks Darstellbarkeit in einem Bericht, größere Umfänge zusammengefasst. Es wird hier, im Gegensatz zu Gewohnheiten in der Konstruktion, Wert auf die Darstellbarkeit eines Bilanzplanes auf einer A4-Seite gelegt, auch wenn große Zeichnungen manchmal übersichtlicher sind.

Aus der Stückliste können im Prinzip Werkstoff und Gewicht aller Teile entnommen werden, jedoch nicht der Aufwand für deren Herstellung. Der Herstellungsaufwand wird getrennt ermittelt oder vom Zulieferer bereitgestellt. Komponenten, für die es noch keine expliziten Angaben für deren Herstellungsaufwand gibt, sind blass dargestellt. Es sind Platzhalter, die auf fehlende Daten aufmerksam machen. Gerechnet wird in diesem Fall mit vorläufigen Schätzungen, die auf bekannten Teilen ähnlicher Technologie beruhen.

Es sei hier darauf hingewiesen, dass die Prozesse in einem Plan logisch, aber nicht räumlich zusammen gehören, auch wenn die Bezeichnungen "Produktion" und "Montage" dieses nahelegen. Der Stickstoff für das Blasen des Kunststofftanks wird angeliefert und nicht vor Ort hergestellt.

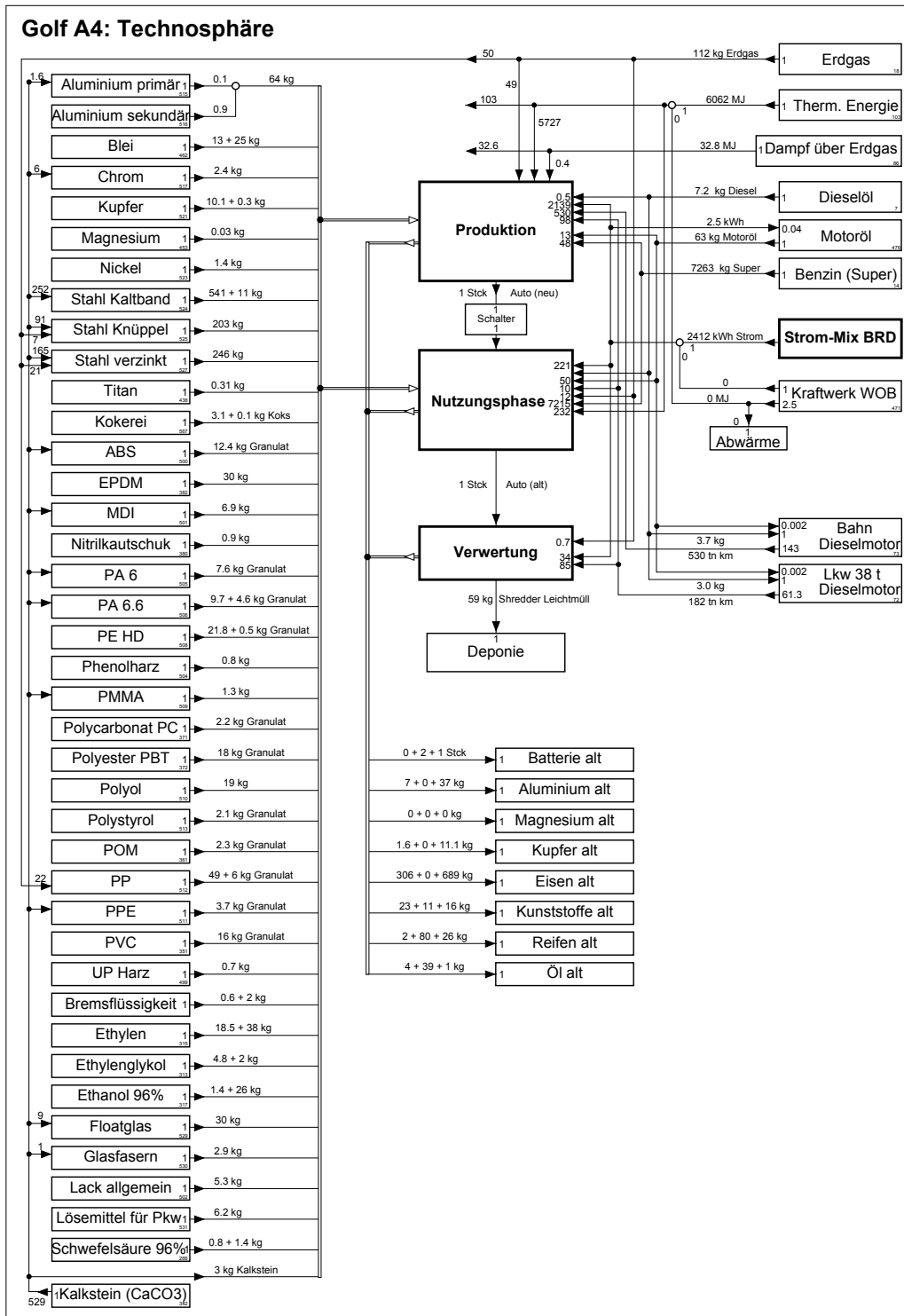


Bild 5: Der oberste Plan "Golf A4: Technosphäre". Die angegebenen technischen Flüsse sind bereits Ergebnisse der Bilanz. Die Werkstoffe fließen hauptsächlich in die Produktion, Mengen für die Nutzungsphase (Ersatzteile) sind an 2. Stelle angegeben. Die beiden Prozesse "Aluminium primär" und "Aluminium sekundär" liefern in einen benutzerdefinieren Sammelknoten. Der Strom für die Produktion wird, zwecks Übersichtlichkeit und Vergleich mit anderen Bilanzen, aus dem Modul "Strom-Mix BRD" entnommen. Module sind in der Datenbank durchnummeriert, die Position ist unten rechts zur eindeutigen Kennung eingetragen. Flüsse, die die Plangrenze durchqueren, werden in der Regel nicht gezeigt, damit der Plan übersichtlich bleibt.

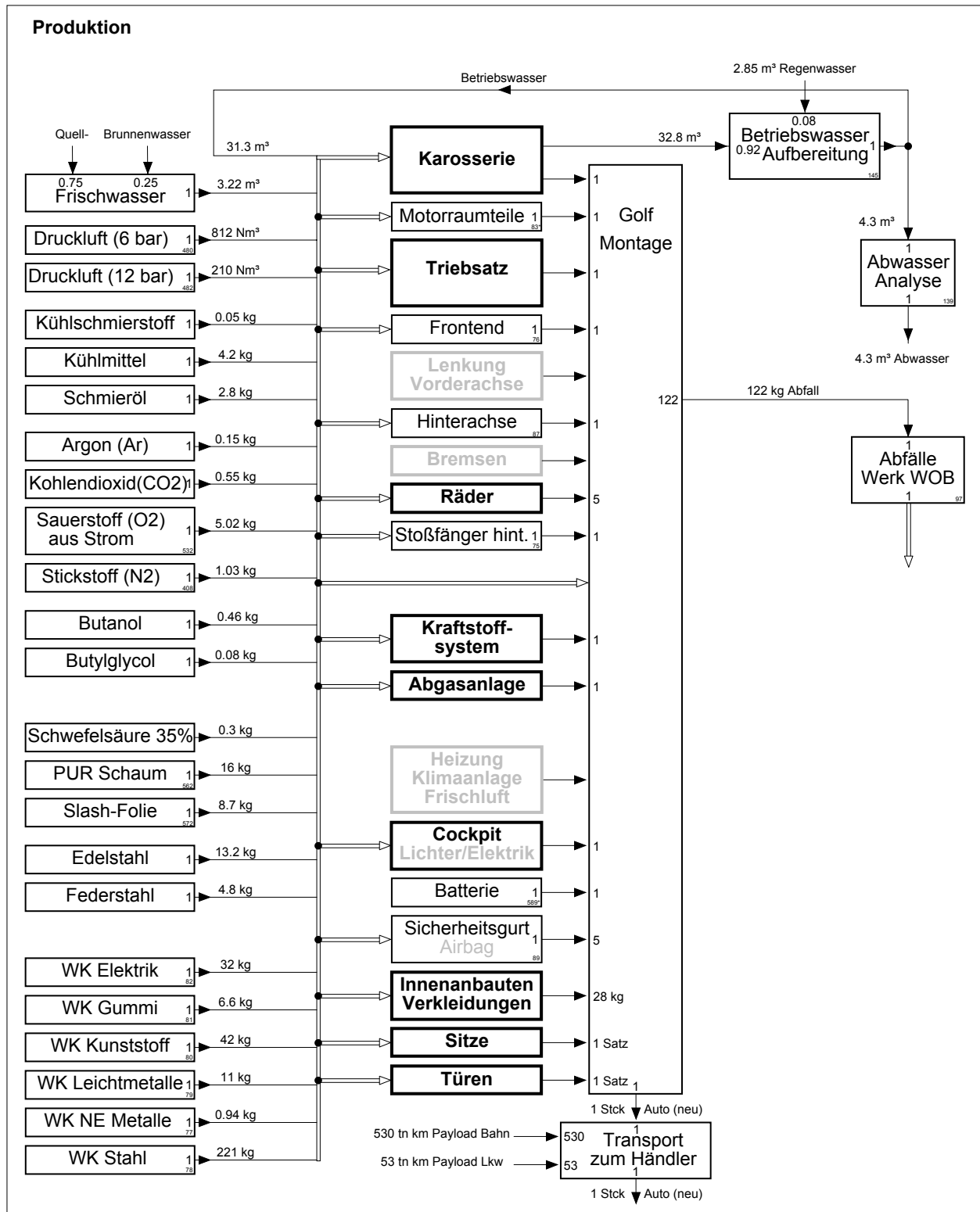


Bild 6: Bilanzplan der Produktion. Die "Golf Montage" sammelt die großen ZSB's und fügt sie zusammen. Die blassen Unterpläne sind Platzhalter für Daten, die noch fehlen. Ersatzdaten für die Platzhalter befinden sich in den Werkstoffklassen (WK). Prozessstoffe und Hilfsenergien werden hier aufgeführt, falls sie in einem Unterplan an mehreren Stellen benötigt werden, z.B. Kühlschmierstoff bei der mechanischen Bearbeitung von Motor und Getriebe.

3.2 Nutzungsphase

Die Nutzungsphase, Bild 7, ist im Vergleich zur Produktion recht einfach, weil nur die "durchschnittliche Nutzung" eines Pkw betrachtet wird. Der Prozess "Betrieb" fordert die gesamte Fahrleistung, sowie eine bestimmte Anzahl von Fahrzeugwäschen und -wartungen an.

Der Prozess "Verbrauch 1.4 l 55 kW" enthält die Tabelle mit den nach dem gesetzlichen Fahrzyklus gemessenen Verbrauch und Emissionen. Die Fahrzeugwäsche, Bild 8, wird laut Auskunft von Waschanlagenbetreibern bilanziert. Es wird eine Wartung alle 15000 km angesetzt, d.h. 10 Wartungen in der gesamten Lebensdauer. Die wesentlichen Verbrauchsteile werden so angefordert, dass sich in der Lebensdauer eine realistische Stückzahl ergibt. Auf viele, aber selten zu tausenden Teile wurde hier verzichtet.

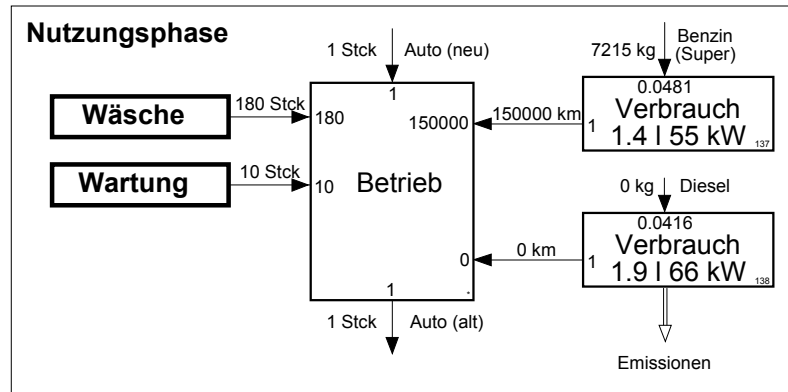


Bild 7: Bilanzplan der Nutzungsphase. Der Prozess "Betrieb" fordert die Fahrstrecke und eine definierte Anzahl von Wäschen und Wartungen an. Der Prozess "Verbrauch 1.4 l 55 kW" enthält die Tabelle von Verbrauch und Emissionen.

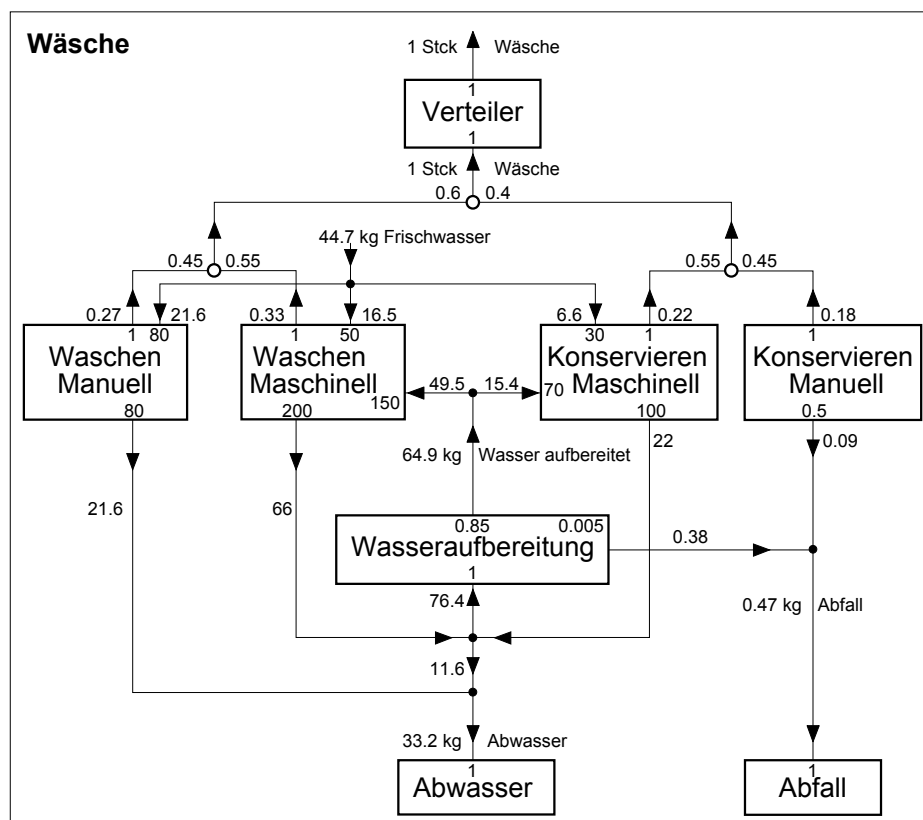


Bild 8: Bilanzplan für die Wäsche. In den 3 oberen Knoten werden die Fahrzeuge verteilt, unten fließen Abwasser und Abfälle. Die Schleifen in der Abwasserführung und -aufbereitung können eindeutig mit den Angaben in den Basisprozessen aufgelöst werden, indem vom obersten Fluss "1 Stck Wäsche" gestartet wird.

4 Datenerhebung

Die meisten Daten für die Umweltbilanz liegen bereits vor, jedoch in einer nicht direkt verwendbaren Form. Nur ganz wenige Daten werden speziell für die Bilanz gemessen, darunter die Gewichte der Werkzeuge für die mechanische Bearbeitung des Motors.

Angaben über Einzelteile des Golf mit Werkstoff und Gewicht werden aus der Entwicklungsstückliste mit speziellen C++ Programmen gewonnen. Angaben zur mechanischen Fertigung des Motors in Salzgitter, sowie über Energieversorgung, Abwässer und Abfälle im Werk Wolfsburg werden mit Hilfe von EXCEL-Tabellen in eine für die Bilanz brauchbare Form gebracht. Wesentliche Daten für die Nutzungsphase stammen aus den Messwerten von Verbrauch und Emissionen im NEDC und aus neuen Werten für nicht-limitierte Emissionen [13].

Der komplette Datensatz besteht aus 900 Stoffen und Produkten, 500 Basis-Prozessen (davon 300 Bibliotheksmodule) und 58 Plänen. Auf den Abdruck der Basis-Prozesse wird hier verzichtet.

Die Datenaufbereitung mit Hilfe von EXCEL-Tabellen wird nun am Beispiel der mechanischen Bearbeitung des Motors im Werk Salzgitter und der Abwässer und Abfälle im Werk Wolfsburg exemplarisch näher erläutert.

4.1 Allgemeine Daten

Die Marke Volkswagen produziert an mehreren Standorten. Die allgemeinen Daten, Tabelle 1, werden für die Normierung auf 1 Stück Golf benötigt.

Marke Volkswagen, Allgemeine Daten, 1999

Mitarbeiter der Marke Volkswagen	104203
Mitarbeiter im Werk Wolfsburg	50061
davon Leistungslöhner	21403
Zeitlöhner	10593
Angestellte	16359
Auszubildende	1706
Produzierte Einheiten pro Mitarbeiter	19
im Werk Wolfsburg	12
Tagesproduktion im Werk Wolfsburg	2400
Produktion Marke Volkswagen	1980601
Lupo	89757
Polo	315500
Golf	791969
Bora	125158
Toledo	100759
Passat	420233
Alhambra	27440
Sharan	50306
Ford Galaxy	59479
Produktionseinheiten im Werk Wolfsburg	588835
Lupo	89757
Bora	121957
Golf	377121
davon Golf, 4 Türen, 1.4 l 55 kW Otto	45273
Golf, 4 Türen, 1.9 l 66 kW TDI	30506
Lackierte Fläche pro Lupo [m ²]	71
Lackierte Fläche pro Golf / Golf Variant [m ²]	83 / 86
Lackierte Fläche pro Bora / Bora Variant [m ²]	85 / 85

Tabelle 1: Tabellenblatt mit den allgemeinen Daten. Kursiv gedruckte Zahlen sind aus Daten in diesem Tabellenblatt berechnet, z.B. "Produktion Marke Volkswagen" = Summe von "Lupo" bis "Ford Galaxy".

4.2 Mechanische Bearbeitung des Motors im Werk Salzgitter

Der Motor besteht unter anderem aus Zylinderkopf und Zylinderkurbelgehäuse. Im Zylinderkurbelgehäuse befinden sich Kolben, Pleuel, Kurbelwelle, etc. Die Kurbelwelle wird in den Schritten "Herstellung Kurbelwelle Rohling", "Vorbearbeiten des Rohlings", "Härten", "Fertig bearbeiten", "Finishen" und "Waschen" hergestellt. Der Meister oder die Kostenstelle führt Buch über die im Halbjahr gefertigten Kurbelwellen und die dafür eingesetzten und verbrauchten Werkzeuge, Kühlschmiermittel und Schmierstoffe. Man erhält dort die in Tabelle 2 Spalte "Daten" wiedergegebenen Zahlen. Die einzelnen Werkzeuge und Teile werden gewogen. Die Spalte "Menge/KW_vor" (Menge pro vorbereitete Kurbelwelle) soll in die Bilanz als Basis-Prozess eingesetzt werden und muss dafür normiert werden. Die einzelnen Werkzeuge und Schmierstoffe sollen in Masse umgerechnet werden. Die Umrechnung und Normierung erfolgt mit Formeln, die in die Spalte "Menge/KW_vor" eingesetzt werden, z.B. "Einlippbohrer 5,0" = $100 \cdot 93 / (1000 \cdot 183419)$. Unten im Abschnitt "Output" gibt es ein paar Daten und berechnete Werte. So ist z.B. der "Werkzeugschrott" die Summe aller Werkzeuge auf der Inputseite. Die Menge "Späne, Grauguss" ist das Produkt der Gewichts Differenz zwischen Rohling und vorbereiteter Kurbelwelle mal der Anzahl Rohlinge (Alle Rohlinge werden bearbeitet, erst dann entsteht der Ausschuss), abzüglich der Gewichtszunahme des Filtervlieses. Die "Verdunstung" ist 90% der Wassermenge (beide Qualitäten). Die Altemulsion schließlich, ist die Summe aller Input-Flüssigkeiten minus "Verdunstung".

Die Richtigkeit der eingesetzten Formeln wird in "Prüfung der Formeln" geprüft. In der Zeile Input steht die Summe aller Input-Massen, in der Zeile "Output" die Summe aller Output-Massen. Diese Bilanz geht mit der Rechengenauigkeit von EXCEL (16 signifikante Stellen) auf, wenn die Formeln stimmen. Eine physikalische Massenbilanz ist das nicht.

Die Berechnungen auf der Outputseite sind erforderlich, weil diese Werte nicht an jeder Bearbeitungsstation gemessen werden. Altemulsion, Späne und Schrotte werden zur Verwertung an zentrale Stellen weitergeleitet.

Die Altemulsion aus vielen Bearbeitungsstationen im Werk Salzgitter wird der zentralen Emulsionsaufbereitung zugeführt. Dort ist die gesamte Menge Altemulsion bekannt, sowie die für die Aufbereitung erforderlichen Mittel, so dass der Prozess "Emulsionsaufbereitung" bilanziert und auf 1 kg Altemulsion skaliert werden kann.

Bei der Auswertung der Tabellen mit einem PC ist auf die einheitliche Schreibweise für Stoffe, Produkte, Werkzeuge, etc. zu achten, denn der PC ist intolerant bei Tippfehlern. "CO2", "C02", "CO2 " und "Kohlendioxid" sind für den PC vier verschiedene Stoffe (beachte das große o, die Null und das Leerzeichen). Zur Vermeidung der Tippfehler und andersartigen Bezeichnungen werden alle Namen der Bilanz in eine Spalte kopiert und dort alphabetisch ohne Doppelnennungen sortiert. Namen mit Tippfehlern erscheinen dann dicht beieinander und können so erkannt und korrigiert werden.

Kurbelwelle, vorbereiten

VW Werk Salzgitter, 1. Halbjahr 1997. Mechanische Bearbeitung, Motor EA 111. Heiko Wolfram, Sept. 1997

	Menge/KW_vor	Daten	
Input			
Werkstück			
Kurbelwelle, unbearbeitet	1,0022626 Stck		9,688 kg/Stck
Werkzeuge			
Einlippbohrer 5,0	5,07E-05 kg	100 Stck/Halbjahr	93 g/Stck
Stufenbohrer 20x14,5	1,83E-05 kg	20 Stck/Halbjahr	167,8 g/Stck
Stufenbohrer 20x15,1	3,026E-05 kg	30 Stck/Halbjahr	185 g/Stck
Wendeplatte 702936-1	7,16E-05 kg	2861 Stck/Halbjahr	4,59 g/Stck
Wendeplatte CNMG 120412 CPX	1,904E-05 kg	400 Stck/Halbjahr	8,73 g/Stck
Wendeplatte RCMT 1204M0 CPX	5,153E-05 kg	1700 Stck/Halbjahr	5,56 g/Stck
Wendeplatte TCMT 110208-UM	9,732E-07 kg	50 Stck/Halbjahr	3,57 g/Stck
Wendeplatte TCMT 16T312 LF	3,386E-05 kg	1800 Stck/Halbjahr	3,45 g/Stck
Wendeplatte TMMG 160408	3,227E-05 kg	950 Stck/Halbjahr	6,23 g/Stck
Wendeplatte TPC 25	2,188E-05 kg	600 Stck/Halbjahr	6,69 g/Stck
Wendeplatte WNMG 080412 MG KC	2,99E-05 kg	600 Stck/Halbjahr	9,14 g/Stck
Wendeschnidplatte E-17640	1,264E-05 kg	300 Stck/Halbjahr	7,73 g/Stck
Wendeschnidplatte SK 2082R00	1,638E-05 kg	400 Stck/Halbjahr	7,51 g/Stck
Wendeschnidplatte SP 8793	6,288E-06 kg	258 Stck/Halbjahr	4,47 g/Stck
Wendeschnidplatte VBMT 160412 U	1,824E-05 kg	430 Stck/Halbjahr	7,78 g/Stck
KSS-Mittel			
Filtervlies, neu	0,0050771 kg	931,24 kg/Halbjahr	
Grotanol SR 1	0,0043572 kg	0,74 m³/Halbjahr	1080 kg/m³
Microgrind M3753	0,0929134 kg	16,84 m³/Halbjahr	1012 kg/m³
Wasser (hart)	1,7795321 kg	326,4 m³/Halbjahr	1000 kg/m³
Wasser (Kondensat)	1,1863547 kg	217,6 m³/Halbjahr	1000 kg/m³
Schmierstoffe			
Bettbahnöl	0,0038164 kg	700 kg/Halbjahr	
Bettbahnöl 220	0,0087505 kg	1605 kg/Halbjahr	
Hydrauliköl HLPD 46	0,0558339 kg	10241 kg/Halbjahr	
Schnellräumöl	0,0269111 kg	4936 kg/Halbjahr	
Spindelöl CLP 5	0,0019627 kg	360 kg/Halbjahr	
Licocut C	0,0284267 kg	5214 kg/Halbjahr	
Energie			
Strom	16,549256 kWh	3035448 kWh/Halbjahr	
Output			
Kurbelwelle, vorbereitet	1 Stck	183419 Stck/Halbjahr	8,447 kg/Stck
Ausschuss, KW	0,019112 kg	415 Stck/Halbjahr	
Filtervlies, verschmutzt	0,0406289 kg	7452,12 kg/Halbjahr	
Altemulsion	0,5195606 kg		
Späne, Grauguss	1,208256 kg		
Verdunstung	2,6692982 kg	90 %	
Werkzeugschrott	0,0004139 kg		

Prüfung der Formeln

Input	12,90427 kg/KW_vor
Output	12,90427 kg/KW_vor
Fehlbetrag	1,78E-15 kg/KW_vor

Tabelle 2: Beispiel zur Datenaufbereitung bei der mechanischen Bearbeitung des Motors. Die "Kurbelwelle, unbearbeitet" (Rohling) kommt von einem Lieferanten, die "Kurbelwelle, vorbereitet" (KW_vor) wird anschließend gehärtet.

4.3 Getriebherstellung im Werk Kassel

Die Fertigung des Getriebes im Werk Kassel wurde neu bilanziert [7]. Die Art der Datenerhebung ist ähnlich wie die bei der Bilanzierung des Motors im Werk Salzgitter.

Das Getriebe besteht aus den Baugruppen Gehäuse, Eingangswelle mit Rädern, Ausgangswelle mit Rädern, Differential, sowie Schalt- und Kaufteile. Die Kupplung auf der Eingangsseite und die Gelenkwellen auf der Ausgangsseite gehören nicht mehr dazu.

Im Werk Kassel werden unter anderem 6 verschiedene Getriebe sowie Motorblöcke aus Leichtmetall produziert. Bei der Bilanzierung des Getriebes "020" müssen deshalb einige Allokationen, d.h. willkürliche Zuordnungen von Energie- und Emissionsanteilen vorgenommen werden. Das erfolgt auf Massenbasis bei der Gießerei (Gehäuse) und Härterei (Stahlteile). Raumwärme und Strom für Beleuchtung werden nach Fläche in den Hallen verteilt.

4.4 Energieversorgung im Werk Wolfsburg

Der Energieverbrauch ist ein wichtiger Kostenfaktor. Er wird im Werk Wolfsburg von der Abteilung Energiemanagement und Versorgungstechnik registriert. Die dort eingehenden Zählerstände werden in der Jahresabrechnung zusammengefasst, Tabelle 3. Eine genaue Zuordnung der Energieverbräuche zu den einzelnen Fahrzeugmodellen ist nicht möglich, d.h. es geht ein durchschnittlicher Energieverbrauch im Werk Wolfsburg pro Fahrzeug in die Bilanz ein. In der Bilanz des Golf A4 werden die Jahresmengen auf die Produktionseinheiten im Werk Wolfsburg (Tab. 1) bezogen und den entsprechenden Modulen zugeordnet.

	Mon- tagen	Lackie- rerei	Kaross- bau	Mech. Fertig.	KTF 1	KTF 2	Anbau- teile	Sitze	Türen- Cockpit	Presswerk	Räder
Sauerstoff [kg]	109	1410	22478	413	371	0	4940	0	0	12942	5872
Acetylen [kg]	10	181	1825	17	34	0	237	0	0	508	988
Stickstoff [tn]	0	0	0	73	0	0	0	0	0	0	0
Kohlendioxid [tn]	0	0	152	3	0	0	47	0	0	0	123
Erdgas [tn]	0	16772	0	898	0	800	0	0	0	160	285
Trinkwasser [1000 m³]	218	1130	141	76	45	56	79	9	5	60	46
Betriebswasser [1000 m³]	1929	1939	1797	2123	1089	1855	1835	187	12	4711	922
Tech. Wärme [1000 GJ]	10	67	0	5	6	2	1	1	0	0	21
Raumwärme [1000 GJ]	230	707	326	170	84	113	172	45	10	109	61
Druckluft 6 bar [Mio. Nm³]	41	94	102	24	7	13	42	2	0	121	5
Druckluft 12 bar [Mio. Nm³]	1	28	50	0	3	2	20	0	0	8	9
Strom [GWh]	86	198	112	82	20	45	45	5	1	67	20

Tabelle 3: Energielieferungen der Versorgungsbetriebe an einzelne Cost Center der Produktion im Werk Wolfsburg, 1999.

4.5 Abwasser und Abfall im Werk Wolfsburg

Da das Werk Wolfsburg in einer wasserarmen Gegend liegt, wurde schon seit seiner Gründung im Jahr 1938 auf einen möglichst geringen Trinkwasserverbrauch geachtet und die notwendigen Pläne und Messstationen erstellt. Durch die Einführung von "Betriebswasser", Brauchwasser das im Werk zirkuliert wird, kann der Frischwasserverbrauch auf ein Minimum reduziert werden. Bild 10 stellt die Wasserströme anschaulich dar. Der umlaufende Betriebswasserstrom ist ca. 6 mal größer als der Abfluss in die Aller.

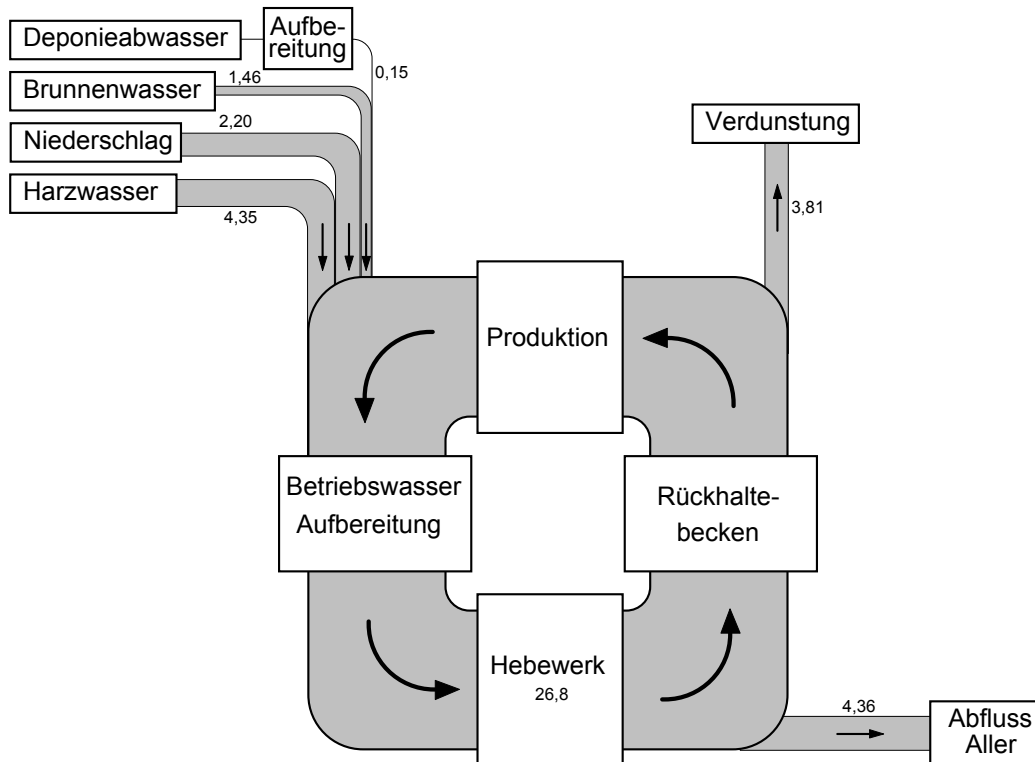


Bild 10: Wasserkreislauf im VW Werk Wolfsburg. Zahlenangaben in Mio. m³, 1999. Interessant ist der große umlaufende Betriebswasserstrom. Das Betriebswasser wird ca. 6 mal genutzt, bevor es in die Aller abgelassen wird. Das Regenwasser wird auf dem Werksgelände gesammelt und als Betriebswasser genutzt, es beträgt 1/3 des gesamten Wasserzulaufs.

Ein detaillierterer Wasserlaufplan ist in Bild 11 wiedergegeben. Das Herzstück der Wasserwirtschaft ist das Betriebswasserrückhaltebecken, es besteht aus einigen Teichen mit einem Fassungsvermögen von insgesamt 1,5 Mio m³. Jahreszeitliche Schwankungen im Wasserzulauf, insbesondere durch Regenwasser, werden mit den Teichen ausgeglichen.

Das Deponieabwasser ist Sickerwasser aus VW-Deponien in der näheren Umgebung. Es wird mit Lkw's angeliefert, mit speziellen Verfahren gereinigt und dann ins betriebsinterne Abwasser geleitet.

Die im Werk anfallenden Abwässer aus Sanitärbereich, Produktion und Kraftwerk werden getrennt geführt, vorgereinigt und schließlich im Abwasserzentrum West geklärt. Das umlaufende Betriebswasser wird hauptsächlich für Kühlung in der Produktion benutzt.

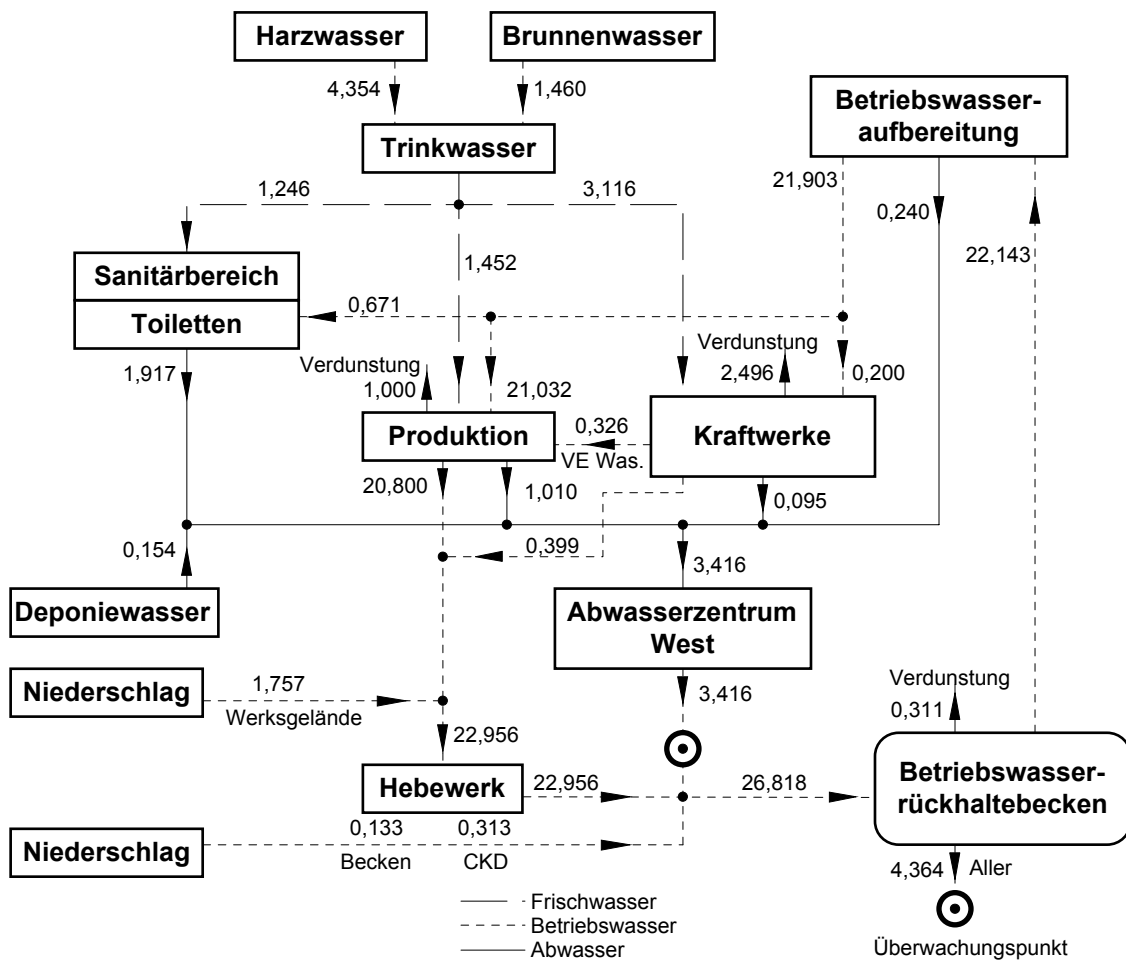


Bild 11: Wasserkreislauf im VW Werk Wolfsburg. Zahlenangaben in Mio. m³, 1999. Das Betriebswasser wird ca. 6 mal genutzt, bevor es in die Aller abgelassen wird. Das verschmutzte Abwasser wird getrennt abgeleitet und im Abwasserzentrum West gereinigt.

Die Datenerhebung des Wasserverbrauchs und Wasseranalysen werden routinemäßig durchgeführt. Auch hier wird streng zwischen Daten und berechneten Folgewerten unterschieden. Daten dürfen nur einmal vorkommen, damit bei Datenkorrekturen alle Folgewerte automatisch aktualisiert werden. Tabelle 4 enthält die Durchflussmengen im Abwasserzentrum West und den Ablauf in den Fluss Aller, zusätzlich sind die gemittelten Abwasseranalysen angegeben.

Ein wesentlicher Anteil des Frischwassers wird dem Kraftwerk Wolfsburg zugeführt, wo es für Kühlungszwecke verdunstet wird. Da die gesamte elektrische Energie in der vorliegenden Sachbilanz aus dem Deutschen Strom-Mix entnommen wird, wird das Kraftwerk Wolfsburg aus dem Wasserkreislauf, Bild 11, herausgerechnet. Der Sanitärbereich und die Altlast der Deponie werden auch herausgerechnet, weil beide außerhalb des Bilanzrahmens liegen. Übrig bleibt dann der in Bild 11a gezeigte Kreislauf, der in die Bilanz eingeht.

Durch das Weglassen der Abwässer aus Sanitärbereich und Kraftwerken ändert sich nicht nur die Abwassermenge sondern auch die Analysewerte. In der Bilanz wird nur die Abwassermenge geändert, nicht die Analysewerte. Auch die Aufteilung der Niederschlagsmenge auf die verschiedenen Bereiche wurde nicht durchgeführt, d.h. der gesamte Niederschlag auf dem Werksgelände wird der Produktion zugeordnet.

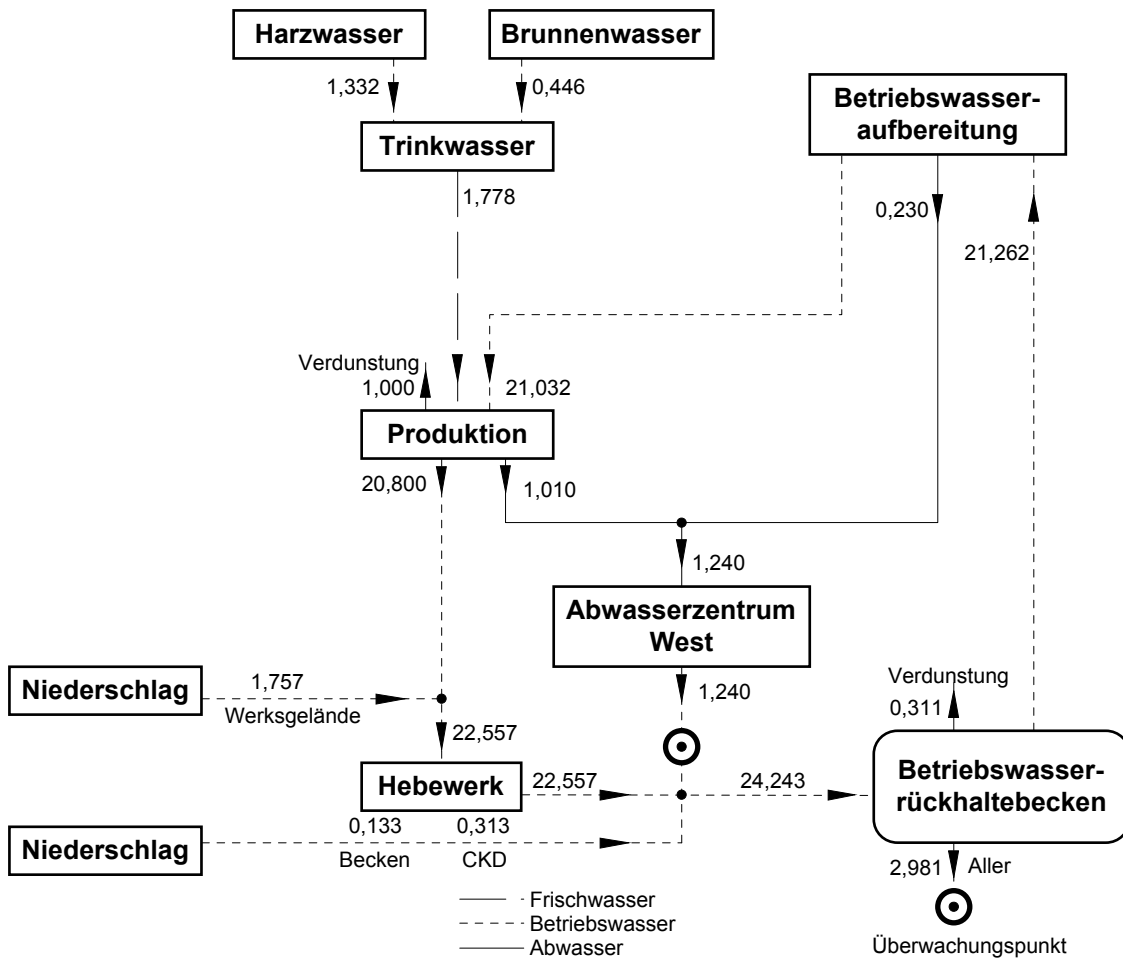


Bild 11a: Wasserkreislauf im VW Werk Wolfsburg, der in die Bilanz aufgenommen wird. Er ist aus den gesamten Wasserkreislauf, Bild 11, durch Herausrechnen von "Kraftwerke", "Sanitärbereich" und "Deponiewasser" abgeleitet. Die Wasserströme in der "Produktion" bleiben erhalten und bestimmen die restlichen Flüsse. Zahlenangaben in Mio. m³, 1999.

Die Genauigkeit der Daten wird von der Messmethode bestimmt. Direkt messbare Größen sind in der Regel genauer als indirekt gemessene. Ein Beispiel für direkt messbare Größen ist die Menge Lackschlamm. Die mehr oder weniger kontinuierlich anfallenden Lackschlämme werden in einem Behälter aufgefangen und gewogen. Ganz anders ist das bei den indirekt gemessenen Werten, darunter die Schadstoffe im Abwasser. Das Abwasservolumen wird kontinuierlich registriert, die Schadstoffmenge wird aus monatlich durchgeführten Abwasseranalysen berechnet. Das monatliche Abwasservolumen in die Aller schwankt zwischen 0,16 und 0,80 Mio m³/Monat, die Stichproben des CSB-Wertes liegen zwischen 21 und 50 mg O₂/l. Zur Berechnung des CSB-Wertes für die Bilanz (Gesamtmenge in 1999 pro Golf) kann das Abwasservolumen 1999 mit dem Jahresmittel des CSB multipliziert, oder die monatlichen Abwassermengen x CSB-Wert der monatlichen Analysen aufsummiert werden. Beide Berechnungsverfahren differieren um 11%, was einen Anhaltswert für den Fehler vom CSB-Wert liefert. Bei anderen Schadstoff-Frachten, auch denen in Abgasen, können die Fehler größer sein, z.B. bis zu 20% beim Nitrat.

Stoff	Einheit	Grenzwert	Ablauf AWZ	Ablauf Aller
Durchfluss in Jahr 1999	Mio m ³		3,416	4,364
Temperatur	°C		21,6	15,5
pH-Wert		6,5 - 9,5	7,22	8,44
Leitfähigkeit	µS/cm		1479	799
Karbonathärte	°dH			8,01
Trübung	TE/F		24	
Ammonium-Ionen (NH ₄ ⁺)	mg N/l	4	0,3	0,10
Adsorbierbare organisch gebundene Halogene (AOX)	µg Cl/l	100	51	35
Barium (Ba)	µg Ba/l	2000	33	
Benzol (C ₆ H ₆)	µg/l		0,25	
Blei (Pb)	µg Pb/l	50		2,8
Biochemischer Sauerstoffbedarf (BSB ₅)	mg O ₂ /l	15	7,9	5,0
Cadmium (Cd)	ng Cd/l			173
Calcium (Ca)	mg Ca/l			82
Chlorid (Cl ⁻)	mg Cl/l	500		109
Chrom (Cr)	µg Cr/l	500	21	2,5
Chemischer Sauerstoffbedarf (CSB)	mg O ₂ /l	60	92	33
Dichlormethan (CCl ₂ H ₂)	ng/l		30	
Eisen (Fe)	µg Fe/l			155
Ethylbenzol (C ₆ H ₅ C ₂ H ₅)	µg/l		0,38	
Kohlenwasserstoffe	µg/l	5000	475	
Kupfer (Cu)	µg Cu/l		11	12,7
Magnesium (Mg)	mg Mg/l			11,4
Nickel (Ni)	µg Ni/l	120	76	49,4
Nitrat (NO ₃ ⁻)	mg N/l		4,7	1,7
Nitrit (NO ₂ ⁻)	µg N/l	1000	128	44
Phosphor gesamt (P)	µg P/l	1000	1510	560
Quecksilber (Hg)	ng Hg/l			67
Sauerstoff (O ₂)	mg/l			11
Schlamm	mg/l		421	6,6
Stickstoff gesamt (N)	mg N/l	10	5,2	1,8
Sulfat (SO ₄ ⁻⁻)	mg SO ₄ /l	300		123
Tetrachlorethen (C ₂ Cl ₄)	µg/l		1,02	
Tetrachlormethan (CCl ₄)	ng/l		30	
Gesamter organisch gebundener Kohlenstoff (TOC)	mg/l			15,9
Toluol (C ₆ H ₅ CH ₃)	µg/l		1,0	
1,1,1-Trichlorethan (C ₂ Cl ₃ H ₃)	ng/l		30	
Trichlorethen (C ₂ Cl ₃ H)	ng/l		58	
Trichlormethan (CCl ₃ H)	ng/l		30	
m/p-Xylol [C ₆ H ₄ (CH ₃) ₂]	µg/l		0,48	
o-Xylol	µg/l		3,5	
Zink	µg Zn/l	500	128	47

Tabelle 4: Abwasseranalysen an den Überprüfungspunkten "Abwasserzentrum (AWZ)" und "Aller" in Bild 11. Die Konzentrationen sind Durchschnitte der monatlichen Messwerte im Jahr 1999.

Als Beispiel für die Erhebung von Abfalldaten zeigt Tabelle 5 die an den Werkstoren registrierten Ausfahrten mit Abfällen. Die Abfallarten werden laut Europäischen Abfallartenkatalog (EKA) bezeichnet. In der Tabelle sind nur die größten Posten aufgeführt.

Die Zuordnung der Daten aus Tabelle 4 und 5 zu den einzelnen Fahrzeugmodellen ist nicht möglich. In der Bilanz werden diese Daten auf die Produktionseinheiten im Werk Wolfsburg (Tab. 1) bezogen.

Abfälle im Werk Wolfsburg		1999	1999
Metallische Abfälle zur Verwertung	EAK-Schlüssel	Menge [t]	Menge [kg/Fzg]
Eisenschrott	170405	34744	59,00
Kabelschrott	170408	1232	2,09
Aluminiumschrott	120103	1050	1,78
NE-Schrott	120103	195	0,33
Gewerbeabfall zur Verwertung			
Papier und Kartonagen	150101	6712	11,40
Holz	150103	4603	7,82
Kunststoffabfall	120105	3663	6,22
PVC-Abfälle	120105	358	0,61
Elektronikschrott	160205	302	0,51
Kunststofffolien	150102	388	0,66
Gewerbeabfall zur Beseitigung			
Verpackungsmaterial	150106	4183	7,10
Hausmüllähnlicher Abfall	150106	3249	5,52
Kunststoffabfall	170203	1944	3,30
Holzabfälle	150103	1122	1,91
PVC-Abfälle	120105	247	0,42
Sonderabfall zur Verwertung			
Lackreststoffe	080107	1810	3,07
Altöl	120107	1640	2,78
Verdünnern	070704	512	0,87
Schleifschlamm	120111	585	0,99
Sonderabfall zur Beseitigung			
Lackschlamm	080107	211	0,36
Überschussschlamm	190201	2725	4,63
Hydroxidschlamm	190201	1702	2,89
Schlamm aus Öltrennanlagen	130502	343	0,58
Phosphatierschlamm	110108	360	0,61
Transformatoren, Kondensatoren	160201	322	0,55

Tabelle 5: Die Daten über Abfälle werden von Menge/Kalenderjahr in Menge/Fahrzeug mit Hilfe der allgemeinen Daten aus Tabelle 1 umgerechnet. Der Bezugswert ist die Anzahl produzierter Einheiten im Werk Wolfsburg (588 835).
Stanzreste, die der Werkstofflieferant zurück nimmt, sind in der Tabelle nicht enthalten.

4.6 Zulieferer

Einige Zulieferer, z.B. für Batterie, Reifen und Stahl-Kleinteile, produzieren ähnliche Teile in unterschiedlichen Größen und beliefern mehrere Automobilhersteller. Es ist dann aus Allokationsgründen nicht möglich, eine Bilanz für spezielle Golf Teile zu erstellen. In solchen Fällen wird vom Zulieferer eine "Teilbilanz auf Massengrundlage" geliefert, z.B. 1 kg Batterie oder 1 kg Reifen, zusätzlich zum Gewicht des an Volkswagen gelieferten Teils.

Für die Gewinnung und Herstellung der Werkstoffe werden kommerziell erhältliche Tabellen eingesetzt.

4.7 Nutzungsphase

Die wesentlichen Beiträge der Nutzungsphase zur Bilanz stammen aus dem Verbrauch von Benzin und Motoröl, aber auch von Kühlmittel, Bremsflüssigkeit, Scheibenreinigungsmittel, sowie Reifen. Bei der Wartung werden Verschleißteile ausgetauscht, darunter Zündkerzen, Ölfilter, Batterie, Stoßfänger, etc.

Der Benzinverbrauch und die damit verbundenen Schadstoffemissionen eines Pkw hängen von der Fahrweise ab. Der Gesetzgeber hat Fahrzyklen zur Messung des Verbrauchs und der Abgasemissionen vorgeschrieben, z.B. der Neue Europäische Abgasfahrzyklus (NEDC) in Europa, US-City und Highway Driving Cycle in den USA. Einige Institutionen, darunter der Allgemeine Deutsche Automobil Club (ADAC), meinen, dass diese Fahrzyklen nicht repräsentativ sind und benutzen eigene Fahrzyklen zur Bestimmung des Verbrauchs. Ein Maß für die Spannweite von Verbrauchswerten aufgrund der Fahrprofile verdeutlichen folgende Werte:

	55 kW Otto	66 kW TDI
US-City	6,0 l/100 km	5,0 l/100 km
NEDC	6,5 l/100 km	4,9 l/100 km
ADAC	8,1 l/100 km	5,9 l/100 km

In der Bilanz wird der NEDC Testverbrauch verwendet.

Die hier verwendeten Daten über Schadstoffemissionen werden ausschließlich mit den genannten gesetzlichen Fahrzyklen und Messvorschriften ermittelt. In der Bilanz werden NEDC Messwerte des Verbrauchs und der limitierten Abgaskomponenten CO, HC und NO_x verwendet. Werte für nicht limitierte Schadstoffe (Partikel, SO₂, SO₄²⁻, N₂O, PAK) liegen für den aktuellen Golf nicht vor, es werden Ersatzdaten [13] vom Golf, gemessen im US-City Driving Cycle, verwendet. Diese Daten gelten als repräsentativ für moderne Ottomotoren mit Dreiwege-Katalysator und Dieselmotoren mit Oxidationskatalysator. Die Daten aus Ref. [14], die noch in der "Sachbilanz eines Golf" [1] verwendet wurden, sind veraltet.

Die Mengen Öl und Bremsflüssigkeit ergeben sich aus den vorgeschriebenen Wartungsintervallen. Das gleiche gilt für die Verbrauchsteile Öl-, Luft-, Kraftstoff- und Pollenfilter, Zündkerzen und Wischerblätter. Im Durchschnitt erhält jedes Auto, laut VW-Kundendienst, einen neuen Stoßfänger.

Daten zur Reifenherstellung werden beim Lieferanten erfragt. Die durchschnittliche Laufstrecke wird mit 43000 km angesetzt. Die Staubemission ergibt sich aus dem Profilschwund und den Reifenabmessungen.

Die Batterie besteht aus einem Polypropylen-Gehäuse, Blei - Bleioxid und 25%iger Schwefelsäure. Ihre Lebensdauer wird mit 4 Jahren angesetzt.

Der Aufwand für Fahrzeugwäsche und Lackpflege wird durch Befragung von Waschanlagenbetreibern ermittelt. Den zugehörigen Prozess zeigt Bild 8.

Der Aufwand und die Abfälle von Kfz-Betrieben wurde nicht ermittelt. Es wird vermutet, dass hier eine nicht zu vernachlässigende Quelle von Abfällen besteht.

5 Ergebnisse

Diese Sachbilanz deckt spezifische Merkmale eines Pkw auf. Dazu gehören:

- Die Vielfalt der speziell für den Automobilbau entwickelten Werkstoffe
- Die große Anzahl von Einzelteilen, aus denen ein Pkw zusammengebaut wird
- Der Energieverbrauch entsteht überwiegend in der Nutzungsphase
- Nur wenige Schadstoffemissionen (CO_2 , NO_x) dominieren in der Nutzungsphase
- Die hohe Recyclingrate.

Im folgenden werden die allgemeinen Ergebnisse für das gesamte Fahrzeug dargestellt, aber auch einige ausgewählte Einzelergebnisse.

5.1 Allgemeine Ergebnisse

Die kumulative Gewichtsverteilung der Einzelteile, Bild 12, berechnet aus Daten in der Entwicklungsstückliste, zeigt, dass die 80 schwersten Einzelteile erst das halbe Autogewicht ausmachen. Das schwerste "Teil" ist der Kraftstoff (46 / 42 kg) im Tank, gefolgt vom Zylinderkurbelgehäuse (42 kg) beim Diesel oder den 5 Reifen (30 kg) beim Otto. Die Rohkarosserie besteht aus vielen Einzelblechen, die schwersten sind das Dach (12 kg) und ein Seitenteil (11 kg). Die letzten 3% des Gesamtgewichtes bestehen aus mehreren tausend Einzelteilen, darunter Schrauben, Stifte, Clipse, Federn, Stecker, Dichtungen, etc. Die Gewichte der Einzelteile sind überwiegend vom jeweiligen Konstrukteur berechnet, zwecks Gewichtsverfolgung. Bei einigen Komponenten, darunter Lack, ist das schwierig. Dennoch stimmt das so ermittelte Gesamtgewicht mit dem tatsächlichen Fahrzeuggewicht auf wenige kg überein. Ein Abgleich der Einzelgewichte mit Zerlegungsstudien wurde durchgeführt.

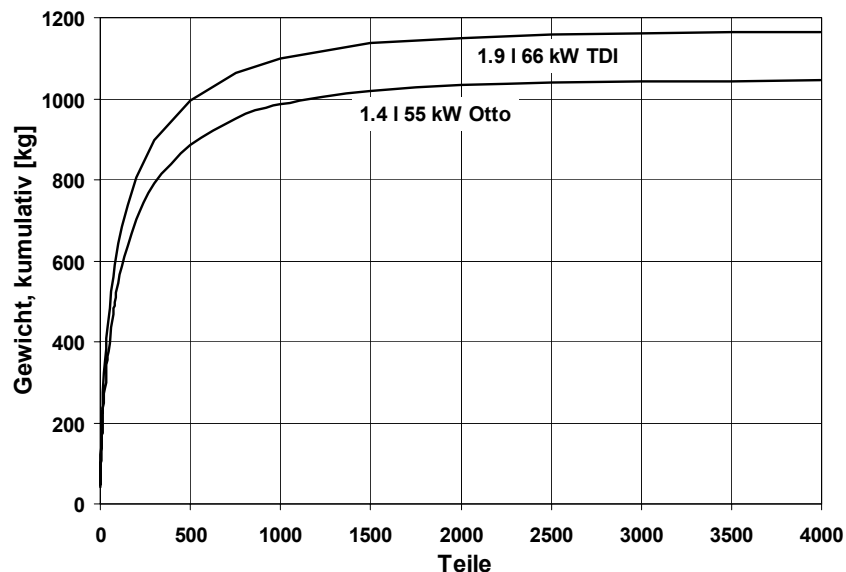


Bild 12: Gewichtsverteilung der Einzelteile vom Golf A4 mit Otto- und Diesel-Motor.

Die schwersten Teile sind:

A4-Otto: Benzin im Tank (42 kg), Reifen (30 kg), Tiefbettfelgen (18 kg)

A4-Diesel: Diesel im Tank (46 kg), Zylinderkurbelgehäuse (42 kg GG), Reifen (34 kg)

Aus der Stückliste ergibt sich auch der Werkstoffkuchen, Bild 13. Ein bevorzugter Werkstoff ist weder unter den großen noch unter den kleinen Teilen erkennbar. Insgesamt dominiert die Werkstoffgruppe Stahl. Die große Anzahl der Stahlsorten ist ein Maß für die Spezialisierung dieses Werkstoffes.

In der zweiten Gruppe, die der Kunststoffe, besteht ein Definitionsproblem: Kunststoffe sind zum großen Anteil Mischstoffe, z.B. Glasfaser verstärktes Polyamid PA 6.6 - 30% GF oder PVC - Plastisol, bestehend aus 25% Binder (PVC), 30% Weichmacher (DINP) und 45% Füller (Kreide). Für die Gewichtsklassierung wird keine Trennung der Kunststoffkomponenten vorgenommen, d.h. Plastisole und Glasfaser verstärkte Kunststoffe werden der Gruppe Kunststoffe zugeordnet.

Der Leichtmetallanteil besteht nur aus Aluminiumlegierungen und ist auffallend klein. Der Hauptanteil befindet sich im Triebwerk (49 kg im Otto, 42 kg im Diesel). Diese Gussteile werden aus 100% Alt-Aluminium (AlSi9Cu3) gegossen.

Kabel, Elektromotoren, Schalter, Sicherungen, etc. werden in einer Werkstoffgruppe "Elektrik" zusammengefasst.

Die Summe der NE-Metalle (Blei, Chrom, Kupfer, Titan) stimmt hier nicht mit den Angaben in Bild 5 überein, weil das Kupfer in E-Motoren und Kabeln, sowie das Blei in Batterien unterschiedlich zugeordnet werden.

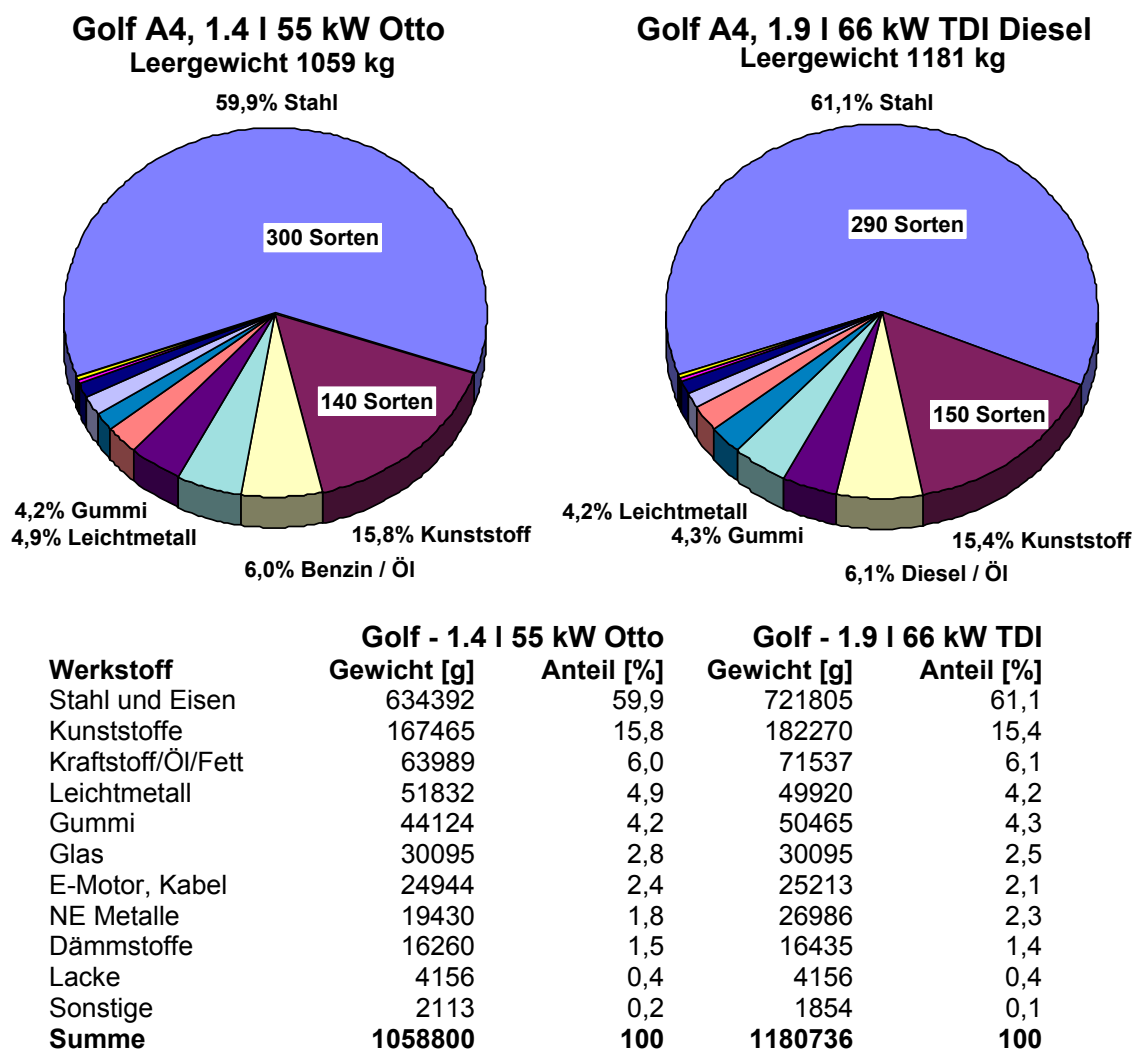


Bild 13: Werkstoffkuchen. Stahl enthält NE-Metalle, z.B. Titan und Chrom, als Legierungskomponenten. Die Leichtmetalle sind überwiegend Aluminiumlegierungen. In den Kunststoffen sind die mineralischen Füller und Faserverstärkungen enthalten. Elektronikteile befinden sich in der Gruppe "E-Motor, Kabel". Die Verstärkungen (Stahl und Gewebe) in den Reifen wurden nicht herausgerechnet. Die vielen Sorten Stahl und Kunststoff sind aus Konstruktions- und Design-Gründen erforderlich.

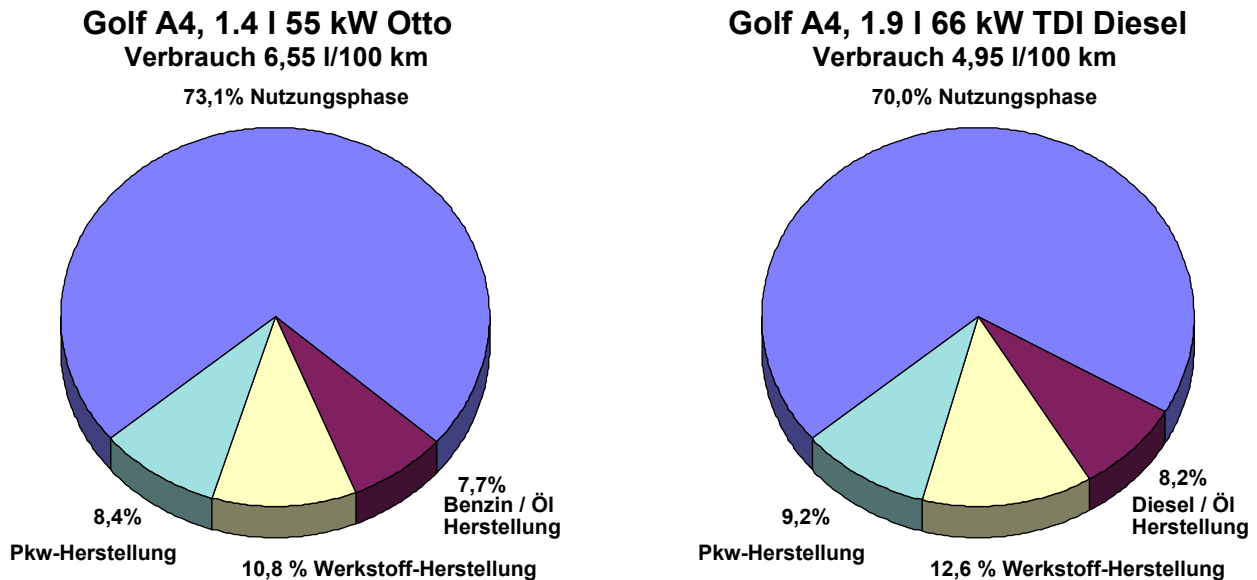
	55 kW Otto	66 kW Diesel
Verbrauch [l/100 km]	6,50	4,95
CO ₂ [g/km]	153	132
CO [mg/km]	101	101
NM VOC [mg/km]	43	15
NO _x [mg/km]	13	377
CH ₄ [mg/km]	9,7	5,6
N ₂ O [mg/km]	39,4	10
SO ₂ [mg/km]	9,2	7,9
SO ₄ ²⁻ [mg/km]	0,7	0,6
Partikel [mg/km]	2,4	30
PAK [µg/km]	13	2

Tabelle 6: Verbrauchs- und Emissionswerte beim Betrieb eines Golf mit 55 kW Otto- und 66 kW Diesel-Motor.

Es werden die gemessenen NEDC-Verbrauchs- und Emissionswerte verwendet. Die Werte für nicht-limitierte Emissionen stammen aus Ersatzdaten [13], gemessen im US-City Driving Cycle. Sie werden von der Kraftstoffzusammensetzung bestimmt. Die hier verwendeten Kraftstoffe (Superbenzin/Diesel) haben eine Dichte von 0,74 / 0,84 kg/l und einen Schwefelgehalt von 100 ppm.

In der Nutzungsphase wird Kraftstoff verbraucht, d.h. verbrannt. Dabei entsteht eine ganze Reihe von Schadstoffen in sehr kleinen Mengen, in Tabelle 6 sind einige aufgelistet.

Der Energieaufwand ergibt sich aus dem Kraftstoffverbrauch, der Kraftstoffherstellung und der Herstellung und Bearbeitung der Werkstoffe, Bild 14. Die Verwertungsphase wurde nicht mit einbezogen, weil die hier zu erwartende Energierückgewinnung aus dem Heizwert in den Werkstoffen den Energieaufwand für Zerlegung und Shreddern bei weitem überwiegt.



Gesamter Primär-Energiebedarf (Otto/Diesel) für 150000 km, 10 Jahre

Primär-Energien		Gesamt	Pkw- Herstellung	Werkstoffe Herstellung	Kraftst. / Öl Herstellung	Nutzung Verwertung
[r] Braunkohle	GJ	4,50/4,66	1,93/1,92	2,19/2,34	0,02/0,02	0,35/0,39
[r] Steinkohle	GJ	30,2/31,6	7,83/7,28	18,9/21,0	2,16/1,90	1,33/1,47
[r] Erdgas	GJ	43,3/43,6	14,5/14,8	14,4/15,0	9,26/8,12	5,11/5,66
[r] Erdöl	GJ	353/313	4,29/4,31	10,5/10,9	21,1/22,1	317/276
[r] Uran (U) natürlich	GJ	11,4/11,3	7,64/7,55	1,15/1,22	1,47/1,29	1,19/1,29
[r] Wasserkraft	GJ	2,54/2,56	1,36/1,35	0,87/0,88	0,05/0,05	0,25/0,28
Summe	GJ	445/407	37,6/37,2	48,0/51,2	34,1/33,4	325/285
	MWh	124/113	10,4/10,3	13,3/14,2	9,47/9,28	90,4/79,2
	%	100,0	8,4/9,2	10,8/12,6	7,7/8,2	73,1/70,0

Heizwert in den Werkstoffen

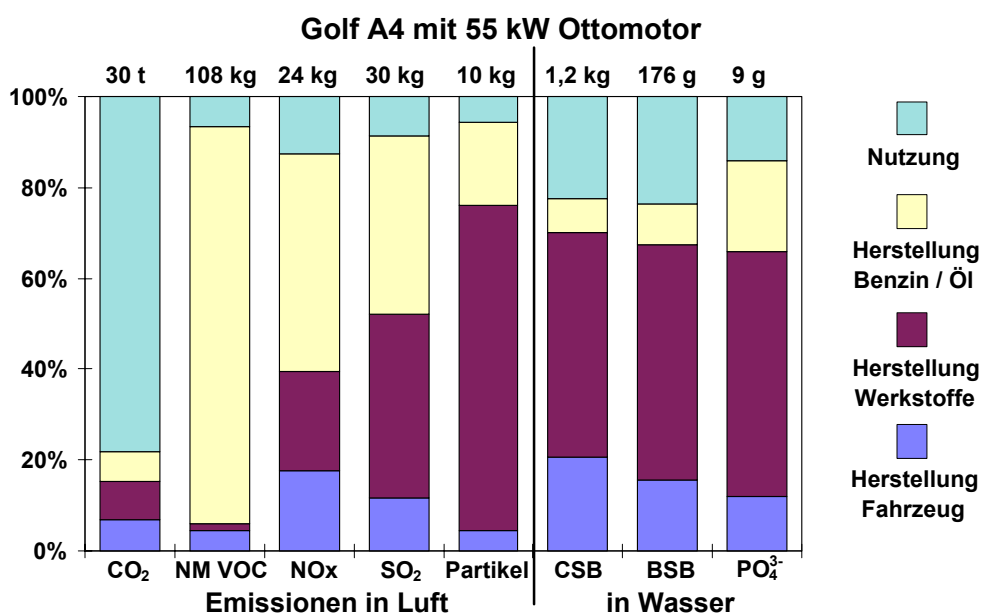
Kunststoffe	GJ	10,0/10,9
Stahl	GJ	4,68/5,33
Leichtmetalle	GJ	1,61/1,55
Sonstige	GJ	0,75/0,77
Summe	GJ	17,0/18,6

Bild 14: Energiekuchen vom Golf A4. Die Primär-Energie wird aus dem unteren Heizwert (Hu) der Ressourcen berechnet. Die Spalte Werkstoff enthält die Gewinnung und Herstellung der Werkstoffe für die Produktion. Die Spalte Pkw-Herstellung enthält nicht die Erstbetankung und Erstbefüllung mit Öl, beides ist in der Spalte Nutzung enthalten. Der Heizwert ist die bei der vollständigen Oxidation freiwerdende chemische Energie der Werkstoffe, d.h. Rückführung in den ursprünglichen Zustand der Ressourcen. Der Heizwert beträgt 35% der Energie zur Herstellung der Werkstoffe.

Für die Herstellung der Werkstoffe werden Ressourcen in Form von Erzen gebraucht, Tabelle 7 zeigt ein Auswahl.

	Golf A4, 55 kW Otto	Golf A4, 66 kW Diesel
Bauxit ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) (21,1% Al)	25	21
Chromerz	5,9	5,5
Dolomit ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$)	6,2	6,3
Eisenerz (65% Fe)	1476	1622
Feldspat (Aluminiumsilikate)	6,0	6,0
Kalkstein (CaCO_3)	666	730
Kupfererze	78	84
Platingruppe- Metallerze	1977	1497
Sand	12	12
Steinsalz (NaCl)	107	101
Titanerze (0,6% Ti)	54	73
Zink-Bleierz (4,2% Zn, 5% Pb)	743	846

Tabelle 7: Ressourcen [kg] für Werkstoffe



Emissionen [kg/Pkw]	Gesamt	Pkw- Herstellung	Werkstoffe Herstellung	Benzin / Öl Herstellung	Nutzung Verwertung
[a] Kohlendioxid (CO ₂)	29732	1890	2512	1991	23339
[a] NM VOC (Summenwert)	107,6	4,8	1,6	94,3	7,0
[a] Stickoxide (NO _x)	23,7	4,2	5,2	11,5	3,0
[a] Schwefeldioxid (SO ₂)	29,9	3,3	12,1	11,9	2,6
[a] Staub und Partikel (unspez.)	10,09	0,46	7,19	1,85	0,59
[w] Chem. Sauerstoffbedarf (CSB)	1,178	0,193	0,605	0,093	0,288
[w] Biochem. Sauerstoffbedarf (BSB)	0,176	0,026	0,092	0,016	0,042
[w] Phosphat (PO ₄ ³⁻)	0,009	0,001	0,006	0,002	0,001

Bild 15: Ausgewählte Emissionen bei einer Fahrstrecke von 150000 km in 10 Jahren und einem durchschnittlichen Verbrauch von 6,55 l/100 km. Die Partikel-Emission der Herstellungsprozesse ist Staub, in der Nutzungsphase sind es Partikel im Abgas und Staub. Die Emissionen in Luft aus der Nutzungsphase stammen zu über 95% aus dem Motorabgas, mit Ausnahme von SO₂ und Partikel.

Einige ausgewählte Emissionen zeigt Bild 15. Die Emissionen aus der Herstellung von Werkstoffen und Kraftstoff entstehen zum großen Teil außerhalb von Europa.

Die CO₂ Emission ist im wesentlichen durch die Werkstoffgewinnung, in der Nutzungsphase durch die Verbrennung von Kraftstoff bestimmt.

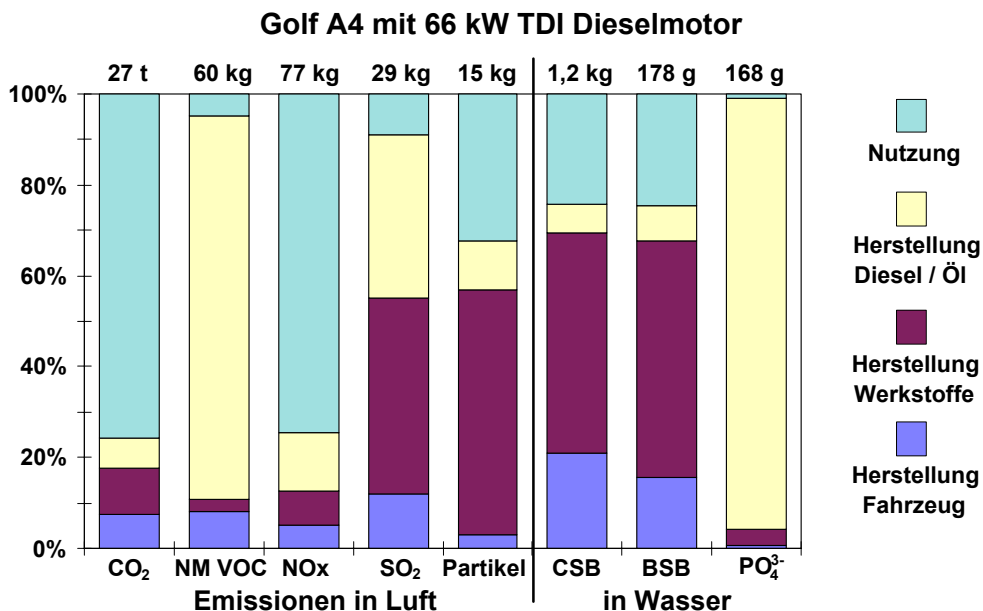
Kohlenwasserstoffe, hier ist nur der "Nicht Methan" Anteil NM VOC dargestellt, stammen größtenteils aus dem Gebiet der Erdölquellen und aus Verlusten beim Umfüllen von Benzin.

Die geringe NO_x Emission in der Nutzungsphase des Golf (13 mg/km) spiegelt den hohen Entwicklungsstand des 3-Wege Katalysators wieder. Man beachte die dafür aufgebrauchte Menge Erz, Tabelle 7.

Die SO₂ Emission stammt überwiegend aus der Herstellung von Benzin und Werkstoffen. In der Nutzungsphase stammt SO₂ zur Hälfte aus dem Motorabgas. Es wurde mit einem Schwefelgehalt im Kraftstoff von 100 ppm gerechnet. Die andere Hälfte stammt aus der Herstellung von Ersatzteilen, darunter Batterien, Reifen und elektrischen Strom.

Die Säule "Partikel" fasst die Stäube der Herstellungsphase und die Partikel im Motorabgas in der Nutzungsphase zusammen, der Reifenabrieb wird getrennt ausgewiesen (Tabelle 10).

Die BSB- und CSB-Emissionen in der Nutzungsphase stammen sowohl aus der Fahrzeugwäsche als auch aus der Herstellung von Ersatzteilen. Bezogen auf die zugehörige Abwassermenge von 8 m³ sind diese Emissionen sehr gering.



Emissionen [kg/Pkw]	Gesamt	Pkw- Herstellung	Werkstoffe Herstellung	Diesel / Öl Herstellung	Nutzung Verwertung
[a] Kohlendioxid (CO ₂)	26602	1889	2688	1748	20277
[a] NM VOC (Summenwert)	60,2	4,9	1,6	50,8	2,9
[a] Stickoxide (NO _x)	77,5	3,8	5,6	10,1	57,7
[a] Schwefeldioxid (SO ₂)	28,5	3,2	12,3	10,4	2,6
[a] Staub und Partikel (unspez.)	14,61	0,46	7,77	1,62	4,76
[w] Chem. Sauerstoffbedarf (CSB)	1,176	0,196	0,593	0,082	0,306
[w] Biochem. Sauerstoffbedarf (BSB)	0,178	0,026	0,093	0,014	0,044
[w] Phosphat (PO ₄ ³⁻)	0,168	0,001	0,006	0,161	0,002

Bild 15a: Ausgewählte Emissionen bei einer Fahrstrecke von 150000 km in 10 Jahren und einem durchschnittlichen Verbrauch von 4.95 l/100 km. Die Partikel-Emission der Herstellungsprozesse ist Staub, in der Nutzungsphase sind es Partikel im Abgas und Staub. Die Emissionen in Luft aus der Nutzungsphase stammen zu über 95% aus dem Motorabgas, mit Ausnahme von SO₂ und Partikel.

5.2 Mechanische Bearbeitung des Rumpfmotors im Werk Salzgitter

Im Werk Salzgitter wird der Rumpfmotor, das ist gewichtsmäßig etwa der halbe Fertigmotor, gebaut. Tabelle 8 zeigt einige Bilanzergebnisse. In dieser Tabelle sind viele Teile und Rohlinge nicht enthalten, darunter Auslassventile, Kolben, Rohlinge von Kurbelgehäuse, Zylinderkopf, etc. Für die Beurteilung der Zahlen muss man wissen, dass insgesamt (nicht nur für den Golf) 7500 Motoren täglich gebaut werden. Die große Stückzahl hat große Mengen an Werkzeugen, Spänen, Emulsionen, etc. zur Folge, z.B. fallen $7500 \times 9,87 \text{ kg} = 75 \text{ t}$ Altemulsion pro Tag an, für die sich eine Aufbereitung lohnt. Ähnliches gilt für die Späne.

Teil	Gewicht kg	Strom kWh	Werkzeuge g	Späne g	Ausschuss g	Emulsion g
Kurbelgehäuse	29,730	35,03	1,50	4768	247,00	593
Kurbelwelle	8,271	39,45	38,29	1368	54,46	1113
Schwungrad	6,347	3,42	1,34	1177	15,00	934
Zahnkranz	0,505	2,05	13,35	246	3,22	670
Pleuel, 4 Stck	1,490	17,88	5,73	779	17,63	904
Zylinderkopf	8,007	18,55	0,45	1989	0,94	887
Nockenwelle	2,187	14,40	13,89	419	43,22	709
Einlassventil, 4 Stck	0,237	24,49	396,94	54	9,99	1374
Hydrostößel, 8 Stck	0,305	3,43	3,59	17	6,99	657
Späne waschen		3,26				2030
Rumpfmotor Montage		12,89				
Emulsion aufbereiten		0,47				
Summe	57,079	175,32	475,08	10817	398,45	9871

Tabelle 8: Mechanische Bearbeitung des Rumpfmotors in Salzgitter. Die Werkzeuge bestehen aus Stahl (20 g) und Schleifscheiben (455 g). Die Späne werden, getrennt nach Grauguss, Stahl und Aluminium, verwertet. Der Altemulsion werden restliche Späne und Öl entzogen, der verbleibende Wasseranteil geht zu 60% in die Kläranlage und zu 40% in die Waschemulsion.

Nachdem diese Daten ermittelt wurden, wurde eine Relation zwischen dem Bearbeitungsaufwand und dem Teilegewicht gesucht, leider ohne Erfolg. Ganz grobe Richtwerte sind 3 kWh Strom und 0,2 kg Späne + Ausschuss pro kg Werkstück.

Beim Fertigschleifen der Einlassventile werden große Schleifscheiben (120 kg) verwendet. Diese werden nach relativ geringer Abnutzung ins Korund-Recycling (Kristallines Al_2O_3) gegeben. In der Bilanz ist dieses Recycling nicht berücksichtigt, daher der auffallend hohe Werkzeugverbrauch (400 g) für die Einlassventile.

Die 20 g Werkzeugstahl pro Motor summieren sich auf $7500 \times 20 \text{ g} = 150 \text{ kg}$ pro Arbeitstag. Diese Werkzeuge werden zum Teil nachgeschliffen und wieder eingesetzt. Die Bilanz berücksichtigt das nicht.

5.3 Getriebefertigung im Werk Kassel

Seit der ersten Bilanzierung des Getriebes im Jahr 1993 wurde das Aluminium-Umschmelzwerk in Kassel auf 100% Aluminiumschrott umgestellt. Die großen Gussteile, Getriebegehäuse, Zylinderköpfe und Motorblöcke, werden aus der AlSi9Cu3 Legierung gegossen. Das Grundmaterial sind alte Fassadenverkleidungen, Rohre, Aluminiumbleche aller Art sowie alte Gussteile. Dieser Aluminiumschrott wird zunächst auf 0,5 m geschnitten, dann auf Faustgröße geshreddert. Die Eisen- und Stahlreste, wie Bolzen und Verstärkungen werden magnetisch separiert.

In gasbeheizten Drehöfen wird das Altaluminium geschmolzen. Silizium und Kupfer werden nach Bedarf zulegiert. Die flüssige Leichtmetalllegierung wird in kleineren Behältern mit Gabelstaplern zu den Druckgussmaschinen gefahren und dort direkt verarbeitet, d.h. das Altaluminium wird auf seinem Weg vom Schrotthaufen zum fertigen Getriebegehäuse nur einmal geschmolzen.

Wenn der Aluminiumschrott nicht ausreicht, wird Flüssigaluminium von einem Umschmelzwerk in Berlin mit speziellen Tankwagen angeliefert. Auf der Fahrt von Berlin nach Kassel kühlt sich das flüssige Aluminium um 40 bis 60°C ab. Auch dieses Flüssigaluminium wird aus Aluminiumschrott gewonnen.

Die Herstellung von Flüssigaluminium aus Schrott ist energetisch günstig. Es wird, aufgrund der niedrigeren Schmelztemperatur, weniger Energie benötigt als beim Einschmelzen von Eisenschrott.

Neue Getriebebilanz für den Golf A4

Teile	Werkstoffe kg	Strom kWh	Wärme kWh	Werkzeuge g	Späne kg	Schrott kg
Gehäuse (100% Sek. AlSi9Cu3)	16,47	46,5	35,0	0,2	1,12	5,12
Eingangswelle mit Rädern	7,31	20,7	15,2	4,1	3,47	0,07
Ausgangswelle mit Rädern	7,62	18,0	14,9	2,9	2,87	0,11
Differential	8,50	18,5	17,4	3,0	1,91	0,60
Schaltteile	1,37	1,9	2,2	0,5	0,37	0,01
Sonstige	8,25	12,5	4,0			1,04
Summe	49,51	118,1	88,6	10,6	9,73	6,95

Alte Getriebebilanz vom Golf A3

Teile	Werkstoffe kg	Strom kWh	Wärme kWh	Werkzeuge g	Späne kg	Schrott kg
Gehäuse (50% Prim. Al)	11,65	25,4	22,7			
Stahlteile	28,56	131	45,3			13,3
Sonstige	0,8					
Summe	41,01	156,4	68,1			13,3

Tabelle 9: Getriebeherstellung im Werk Kassel. Die neue Bilanz zeigt den Werkstoff- und Energiebedarf für die wesentlichen Baugruppen. Die alte Bilanz ist nicht so differenziert, der Energiebedarf ist unvollständig, weil die Herstellung von 5,8 kg Primär-Aluminium fehlt (175 MJ Primärenergie / kg Al).

Die Wellen und Räder werden aus Stangenmaterial geschmiedet. Das Stangenmaterial wird elektrisch induktiv erwärmt, daraus ergibt sich ein Strombedarf von 0,7 kWh / kg Rohling. Die mechanische Bearbeitung (strahlen, drehen, fräsen, walzen, ...) benötigt weitere 1,5 kWh. Der Strom für Beleuchtung beträgt ca. 5% des gesamten Strombedarfs.

Die Heizung der Hallen ist ein großer Posten. Etwa 1/3 des gesamten Wärmebedarfs ist Raumwärme. Der große Anteil Raumwärme wurde schon in der Produktion im Werk Wolfsburg, siehe Tabelle 3, festgestellt.

6 Diskussion der Ergebnisse

Das Hauptergebnis dieser Sachbilanz ist, dass der wesentliche Energieverbrauch in der Nutzungsphase liegt. Rund 9% der gesamten Energie wird für die Herstellung des Fahrzeuges und 12% für die Gewinnung der Werkstoffe, sowie weitere 8% für die Bereitstellung des Kraftstoffs benötigt. Der Rest, 71%, steckt in der Nutzungsphase, überwiegend im Heizwert des Kraftstoffs, der während der 150000 km Fahrstrecke verbrannt wird, und in den Ersatzteilen (Reifen). Neu ist die Erkenntnis, dass die Energie zur Herstellung des Fahrzeugs von Modell zu Modell steigt, der gesamte Energiebedarf jedoch sinkt, und dass der Energieanteil für die Gewinnung der Werkstoffe größer als der für die Fertigung des Fahrzeuges ist.

In der Nutzungsphase dominieren nur einige atmosphärische Emissionen, darunter die an den Energieverbrauch gekoppelte CO₂, aber auch die CO und NO_x Emissionen. Erstaunlich ist, dass viele andere Emissionen in der Herstellungsphase überwiegen. So treten bei der Herstellung und Verteilung von Benzin die meisten Kohlenwasserstoff- und Schwefeloxid-Emissionen auf. Bei der Gewinnung der Rohstoffe entstehen die wesentlichen Metall- und Chlor- Emissionen.

Die Metallmengen in den Erzen sind kleiner als die im Fahrzeug verbauten Mengen. Das ist eine Folge des Metall-Recycling. Im Pkw wird im wesentlichen Stahl aus frischen Erzen verbaut, das recycelte Eisen wird in anderen Stahlbranchen verwendet. Das im Automobilbau verwendete Leichtmetall enthält einen großen Anteil Sekundär-Aluminium, bis zu 90%.

Der Wasserverbrauch von 95 m³ pro Pkw stammt aus der Stromerzeugung (46 m³), Benzinherstellung (23 m³), Fahrzeugwäsche (8 m³), Werkstoff- (10 m³) und Sonstigem (9 m³). Der Wasserverbrauch bei der Gewinnung der Energieträger (Strom und Benzin) ist etwas willkürlich

angesetzt, ebenso bei der Gewinnung der anderen Rohstoffe, weil es sich hier häufig um Umlaufwasser handelt, dass z.B. einem Fluss entnommen und wieder zugeführt wird. Das Abwasser aus der Fahrzeugwäsche ist relativ wenig belastet. Es führt hier zu einer Problemverlagerung, denn aufgenommene Luft- und Bodenverunreinigungen gelangen ins Abwasser.

Der Golf mit dem 66 kW TDI Motor emittiert im gesamten Lebenszyklus 3 tn CO₂ und 40 kg NM VOC weniger als das gleiche Fahrzeug mit dem 55 kWh Ottomotor. Dem gegenüber stehen Mehremissionen von 50 kg NO_x und 5 kg Partikel/Staub.

Eine Schwachstelle des Benzinfahrzeuges ist die NM VOC Emission. Sie entsteht zum großen Teil bei der Benzinverteilung, weil die Gaspendingung beim Betanken in der Praxis nicht richtig funktioniert. Beim Dieselfahrzeug ist die NO_x Emission die wesentliche Schwachstelle, sie entsteht beim Betrieb des Fahrzeuges. Setzt man die limitierten Emissionen (NM VOC, NO_x, SO₂ und Partikel) in Relation zur CO₂ Emission, so muss man feststellen, dass die Abgasreinigung einen hohen Entwicklungsstand erreicht hat: Die limitierten Emissionen summieren sich auf nur 0,6% der CO₂ Masse.

Das Automobil ist der Konsumartikel mit der höchsten Recyclingrate. Diese ist noch höher als bei Papier. Der Grund ist, dass ein Auto nicht einfach in den Müll geworfen werden kann, und dass die Metallverwertung einen hohen Standard erreicht hat. Bei den Altkunststoffen zeichnet sich eine zunehmende thermische Verwertung ab.

Einige Daten in der Sachbilanz sind alt. Das liegt an der großen Datenmenge, für deren Erhebung einige Jahre benötigt werden. In dieser Zeit wird eine Vielzahl von Prozessen modernisiert, für eine Aktualisierung der Bilanzdaten fehlt die Zeit.

Viele unsichere Daten werden hier mit aufgenommen, obwohl dem Autor die großen Messfehler bewusst sind. Das soll ein Ansporn für die Bereitstellung besserer Daten sein.

Die Beurteilung der Zahlen fällt schwer. Es fehlen Vergleichsmaßstäbe. Sind die 8 m³ Wasser, die während der 10jährigen Nutzungsphase fürs Autowaschen verbraucht werden, nun viel oder wenig. Hier könnte der Wasserverbrauch von einem Einfamilienhaushalt als Vergleich benutzt werden: ca. 50 m³ pro Person und Jahr.

Die Emissionen in Wasser, darunter der chemische (CSB) und biochemische (BSB) Sauerstoffbedarf, sowie der gesamte Stickstoffeintrag (Nitrit, Nitrat, Ammonium, Ammoniak) sind so niedrig, weil es sich um bereits geklärte Abwässer handelt. Zum Vergleich sei hier der BSB Richtwert für ungeklärte kommunale Abwässer genannt: 60 g / Tag und Einwohner.

Nach der Durchführung der Bilanz und dem Hinterfragen der Zahlenwerte wird deutlich, dass die Schwankungsbreite der Daten wesentlich größer ist als typische Fehler im technischen Messwesen. Die Ursachen sind systematischer Natur, sie liegen in nicht genau definierbaren Grenzen des Bilanzrahmens, im gleichzeitigen Bestehen von alten und modernen Produktionsanlagen, in den statistisch nicht genau fassbaren Verhalten der Autofahrer, etc. Dennoch sind die Ergebnisse der bisher durchgeführten Sachbilanzen [1, 3, 4 und die vorliegende] unerwartet stabil.

Mit jeder Sachbilanz entstehen neue zusätzliche Module. Es entstehen auch neue Verbindungen zwischen vorhandenen Datenbanken in den Werken. Eine gemeinsame Datenbank (IMDS) in der Automobilindustrie, einschließlich der Zulieferer, wird z.Z. aufgebaut.

Die durchgeführte Sachbilanz hat gezeigt, dass spezielles Know How von beteiligten Firmen zwar verwendet, aber nicht offen gelegt werden muss. Befürchtungen in dieser Richtung haben sich als unbegründet erwiesen.

Primär-Ressourcen, Erze	Herst. Wk+Pkw	Herst. VK+Öl	Nutz. Pkw	Energieträger	Herst. Wk+Pkw	Herst. VK+Öl	Nutz. Pkw
Bauxit 21% Al [kg]	25			Primärenergie [GJ]	86	34	325
Bleierz 5% [kg]	740						
Chrom 20% [kg]	6			Anteil aus			
Eisen 66% [kg]	1476			Braunkohle [GJ]	4		
Kupfer 0,3% [kg]	78			Steinkohle [GJ]	27	2	1
Nickel 70% [kg]	2			Erdgas [GJ]	29	9	5
Platinerz [kg]	2000			Erdöl [GJ]	15	21	317
Zink 4% [kg]	(740+5)			Kernkraft [GJ]	9	1	1
Kalkstein [kg]	666			Wasserkraft [GJ]	2		
Steinsalz [kg]	100		7				
Wasser [m³]	57	23	15				
Emissionen in Luft							
CO ₂ [tn]	4	2	23	H ₂ SO ₄ [g]	1,2		
CO [kg]	23	1	16	HCl [g]	154	65	4
NM VOC [kg]	6	94	7	HF [g]	39	9	2
CH ₄ [kg]	17	0,3	3	H ₂ S [g]	4	0,1	0,3
NO _x [kg]	9	12	3	C ₆ H ₆ [g]	4	1	470
N ₂ O [kg]	0,3		6	PAK [g]	0,6		2
NH ₃ [kg]			0,9	Cu [g]	3		0,9
SO ₂ [kg]	15	12	3	Mn [g]	2		
Partikel/Staub [kg]	8	2	0,6	Schwermetalle [g]	15		2
Emissionen in Wasser							
AOX [g]	4	0,1	0,6	Na ⁺ [g]	26	5	260
CSB [g]	800	93	290	Fe [g]	6	80	1
BSB [g]	120	16	42	Cu [g]	0,1	0,8	2
TOC [g]	440	50	110	Zn [g]	2		2
Gesamt N [g]	18	0,1	5	Schwermetalle [g]	22	1	9
Phenole [g]	1	1	0,6	HC [g]	110	700	250
Cl ⁻ [g]	1200	29	63	Öle [g]	9		
PO ₄ ³⁻ [g]	6	2	1,4	PAK [g]	0,6	8	
SO ₄ ²⁻ [g]	850	720	22				
Emissionen in Boden							
Asche [kg]	21	10	3	Cr-Schlacke [kg]	105		
Abfall flüssig [kg]		0,5		Cu-Schlacke [kg]	25		1
Abfall fest [kg]	150	1	30	Ni-Schlacke [kg]	12		
Reifenabrieb [kg]			12	Lack-Schlamm [kg]	3		
Hausmüll [kg]	85		85	Erzrückstände [tn]	8		
Sondermüll [kg]	5		11	Abraum [tn]	3		

Tabelle 10: Ausgewählte Ressourcen, ohne Sekundärmaterial, zur Herstellung und Betrieb eines Golf mit dem 55 kW Otto-Motor, und einige Emissionen. Leere Felder sind vernachlässigbar oder nicht bekannt. Bei der Entsorgung fällt 60 kg fester Abfall an. Von anderen Branchen genutzte Sekundär-Rohstoffe, z.B. Stanzreste, sind nicht angegeben. Cu-, Fe-, Mn- und Zn-Emissionen sind in den Schwermetallen nochmal erfasst. Die Abfall-Angaben sind unvollständig, weil die Klassierung hier zu grob ist. Die Zahlen sind mit großen Unsicherheiten behaftet, z.B. halbieren sich die Schwefel-Emissionen in der Nutzungsphase, wenn der Schwefelgehalt im Benzin von 100 auf 0 ppm gesenkt wird. Der Fehler der Energiewerte wird auf ±15% geschätzt, limitierte Emissionen (CO₂, NM VOC, NO_x, SO₂, Partikel) auf ±30%. Nichtlimitierte Emissionen können Abweichungen um den Faktor 10 erreichen.

Abkürzungen

ABS	Acrylnitril/Butadien/Styrol-Copolymer Kunststoff
AOX	Adsorbierbare organisch gebundene Halogene
BSB	Biochemischer Sauerstoffbedarf zur Klärung von Abwasser
CML	Centrum voor Milieukunde, Niederlande
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf zur Klärung von Abwasser
CZ	Cetan-Zahl
EPDM	Ethylen/Propylen/Dien-Kautschuk
F & E	Forschung und Entwicklung
IMDS	International Material Data System
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change, Genf, Schweiz
GJ	Giga Joule = 10^9 Joule, Einheit für Primär-Energie
LCA	Life Cycle Assessment
LCI	Life Cycle Inventory
LCIA	Life Cycle Impact Assessment
MDI	Methylendiisocyanat Kunststoff
MWh	1 MWh = 3.6 GJ
NEDC	Neuer europäischer Fahrzyklus
NM VOC	Flüchtige organische Kohlenstoffverbindungen ohne Methan
PA 6	Polyamid 6 $\text{NH}(\text{CH}_2)_6\text{NH}$ Kunststoff
PA 6.6	Polyamid 6.6 $[\text{NH}(\text{CH}_2)_4\text{NH}][\text{CO}(\text{CH}_2)_6\text{CO}]$ Kunststoff
PAK	Polyaromatische Kohlenwasserstoffe
PE HD	Polyethylen CH_2 hoher Dichte, Kunststoff
PMMA	Polymethylmethacrylat $\text{CH}_2\text{CCH}_3\text{COOCH}_3$ Kunststoff
POM	Polyoxymethylen (CH_2O)
POX	Purgeable (Ausblasbare) organisch gebundene Halogene
PP	Polypropylen $(\text{CH}_2)(\text{CHCH}_3)$ Kunststoff
PPE/PPO	Polyphenylenether/Polyphenylenoxid $\text{C}_6\text{H}_5\text{O}$ Kunststoff
PS	Polystyrol $(\text{CH}_2)(\text{CHC}_6\text{H}_5)$ Kunststoff
PUR	Polyurethan $\text{OCONH}(\text{CH}_2)_y\text{NHCOO}(\text{CH}_2)_x$ Kunststoff
PVC	Polyvinylchlorid $(\text{CH}_2)(\text{CHCl})$ Kunststoff
RME	Rapsmethylester (Biodiesel)
UP	Ungesättigter Polyester
VK	Vergaser-Kraftstoff (Tabelle 10)
Wk	Werkstoffe (Tabelle 10)
ZSB	Zusammenbau von mehreren Einzelteilen

Schrifttum

- 1 G.W. Schweimer, M. Schuckert
"Sachbilanz eines Golf" in
"Ganzheitliche Betrachtungen im Automobilbau"
VDI Berichte Nr. 1307, 1996, S. 235
- 2 G.W. Schweimer, M. Schuckert
"Sachbilanz eines Golf", korrigierte Fassung
VW-Forschungsbericht Nr. K-EFVT 9604 V/5
- 3 G.W. Schweimer
"Sachbilanz des 3 Liter Lupo"
Volkswagen AG, 1998
- 4 G.W. Schweimer, T. Bambl, H. Wolfram
"Sachbilanz des SEAT Ibiza"
Volkswagen AG, 2000
- 5 T. Bambl, Diplomarbeit
"Sachbilanz der Fertigung des SEAT Ibiza
Anteile Abfall, Abwasser und Lackierung"
Fachbereich Maschinenbau, Fachhochschule Regensburg, März 1999
- 6 H. Wolfram, Diplomarbeit
"Sachbilanz der mechanischen Fertigung eines Motors"
Versorgungstechnik, Umwelt- und Hygienetechnik,
Fachhochschule Braunschweig/Wolfenbüttel, Dezember 1998
- 7 M. Levin, Diplomarbeit
"Umweltbilanz eines Pkw-Getriebes"
Wissenschaftliches Zentrum 3
Gesamthochschule/Universität Kassel, September 2000
- 8 EN ISO 14040 European Standard, August 1997,
"Environmental management - Life cycle assessment -
Principles and framework"
- 9 EN ISO 14041 European Standard, Oktober 1998
"Environmental management - Life cycle assessment -
Goal and scope definition and life cycle inventory analysis"
- 10 G.W. Schweimer
"Tree-Structures and Networks in LCI-Mapping, Mathematical Solutions"
SAE Transactions, Journal of Passenger Cars, paper 982226
- 11 "GABI 2.0, Software zur Ganzheitlichen Bilanzierung"
IKP der Universität Stuttgart; PE Product Engineering GmbH, Dettingen/Treck, 1996
- 12 "TEAM 3.0"
Firma Ecobilan, Paris, 1999
- 13 K.-H. Neumann, D. Schürmann, P. Kohoutek, J. Beyersdorf, A. Hartung, C. Nagel, J. Schulze
"Unregulated Exhaust Gas Components of Modern Diesel Passenger Cars"
SAE Technical Papers Series 1999-01-0514
und
A. Hartung, J. Schulze, private Mitteilung für Ottomotoren
- 14 H. Klingenberg und D. Schürmann (Hrsg.)
"Nicht limitierte Automobil-Abgaskomponenten"
Volkswagen AG, Forschung und Entwicklung, 1988

8 Anhänge

Anhang 1: Technische Beschreibung Golf A4, 4 Türen, 1.4 l 55 kW Otto-Motor

Motor		Otto-Motor
Bauart		4 Zylinder in Reihe, vorn, quer
Hubraum	cm ³	1390
Bohrung und Hub	mm	76,5 x 75,6
Verdichtungsverhältnis		10,5 : 1
Höchstleistung	kW / PS / min ⁻¹	55 / 75 / 5000
Max. Drehmoment	Nm / min ⁻¹	128 / 3300
Gemischaufbereitung		Elektronische Zylinder-Einzeileinspritzung
Zündung		Kennfeldzündung, selektive Klopfregelung
Kraftstoff		Super bleifrei/ Normal, mindestens 91 ROZ
Abgasreinigungsmaßnahme		Drei-Wege-Katalysator, Lambda-Sonde
Wechselstromgenerator	A	70
Batterie	Ah / A	44 / 220
Getriebe		5-Gang-Schaltgetriebe
Leistung		
Höchstgeschwindigkeit	km/h	171
Beschleunigung 0-80 / 100 km/h	s	9,2 / 13,9
Verbrauch		Bei Referenzmasse 1130 kg
Stadtzyklus / Ausserstädtisch	l/100 km	8,4 / 5,3
NEDC	l/100 km	6,55
Emission CO ₂	g/km	154
Fahrwerk		
Vorderachs-Federung		Schraubenfedern mit Teleskopstoßdämpfer im Federbein integriert. Dreiecksquerlenker
Hinterachs-Federung		Gasdruckstoßdämpfer mit separater Feder. Verbundlenkerachse, spurkorrigierende Lager
Lenkung		Hydraulisch unterstützte Zahnstangen-Lenkung. Sicherheitslenksäule
Wendekreis	m	10,9
Bremsen		Hydraulisch betätigte, diagonal wirkende Zweikreis-Bremsanlage mit Servo und ABS
Vorder / Hinterradbremse		Belüftete / nicht belüftete Scheibenbremsen
Felgen	Zoll	6J x 14
Reifen		175/80 R14
Aufbau		
Typ		4 türig, 5 Sitze
Länge / Breite / Höhe	mm	4149 / 1735 / 1439
Radstand	mm	2511
Spur vorne / hinten	mm	1513 / 1494
Fassungsvermögen Kofferraum	l	330 / 1184 (min / max)
Tankfüllung max.	l	55
Korrosionsschutz		Vollverzinkt, Kunststoff-Radhausschalen
Gewicht		
Fahrgewicht ohne Fahrer	kg	1043
Zulässiges Gesamtgewicht	kg	1640

Technische Beschreibung Golf A4, 4 Türen, 1.9 l 66 kW TDI-Motor

Motor		TDI-Diesel
Bauart		4 Zylinder in Reihe, vorn, quer
Hubraum	cm ³	1896
Bohrung und Hub	mm	79,5 x 95,5
Verdichtungsverhältnis		19,5 : 1
Höchstleistung	kW / PS / min ⁻¹	66 / 90 / 3750
Max. Drehmoment	Nm / min ⁻¹	210 / 1900
Gemischaufbereitung		Elektronische Direkt-Einspritzanlage, Abgas-Turbolader, Ladeluft-/ Ölkühler
Kraftstoff		Diesel CZ ≥ 49, RME
Abgasreinigungsmaßnahme		Abgasrückführung, Oxidationskatalysator
Wechselstromgenerator	A	70
Batterie	Ah / A	61 / 330
Getriebe		5-Gang-Schaltgetriebe
Leistung		
Höchstgeschwindigkeit	km/h	180
Beschleunigung 0-80 / 100 km/h	s	8,4 / 12,4
Verbrauch		Bei Referenzmasse 1250 kg
Stadtzyklus / Ausserstädtisch	l/100 km	6,5 / 4,1
NEDC	l/100 km	4,95
Emission CO ₂	g/km	132
Fahrwerk		
Vorderachs-Federung		Schraubenfedern mit Teleskopstoßdämpfer im Federbein integriert. Dreiecksquerlenker
Hinterachs-Federung		Gasdruckstoßdämpfer mit separater Feder. Verbundlenkerachse, spurkorrigierende Lager
Lenkung		Hydraulisch unterstützte Zahnstangen-Lenkung. Sicherheitslenksäule
Wendekreis	m	10,9
Bremsen		Hydraulisch betätigte, diagonal wirkende Zweikreis-Bremsanlage mit Servo und ABS
Vorder / Hinterradbremse		Belüftete / nicht belüftete Scheibenbremsen
Felgen	Zoll	6J x 15
Reifen		195/65 R15
Aufbau		
Typ		4 türig, 5 Sitze
Länge / Breite / Höhe	mm	4149 / 1735 / 1439
Radstand	mm	2511
Spur vorne / hinten	mm	1513 / 1494
Fassungsvermögen Kofferraum	l	330 / 1184 (min / max)
Tankfüllung max.	l	55
Korrosionsschutz		Vollverzinkt, Kunststoff-Radhausschalen
Gewicht		
Fahrgewicht ohne Fahrer	kg	1164
Zulässiges Gesamtgewicht	kg	1740

Anhang 2: Wirkungspotentiale

Versauerungspotential

Die Leitsubstanz ist Schwefeldioxid (SO_2). Bestimmt wird die Masse Säurebildner, die bei der Lösung in Wasser entsteht. Beim SO_2 ist es SO_2^{--} , d.h. pro Kilomol und negativer Valenz entstehen $(32 + 2 \times 16)/2 = 32$ kg Säurebildner. Andere Substanzen bilden andere Säurebildner, deren Masse chemisch definiert ist, z.B. NO_2 bildet NO_2^- mit $(14 + 2 \times 16)/1 = 46$ kg pro Valenz.

Das Versauerungspotential ist die Masse des Säurebildners der betrachteten Substanz bezogen auf den Säurebildner von SO_2 .

Für NO_2 wären das $32/46 = 0,696$, also $1 \text{ kg NO}_2 = 0,696 \text{ kg SO}_2 \text{ äquiv.}$

Kohlendioxid (CO_2) wird nicht berücksichtigt, obwohl es einen erheblichen Beitrag zum pH-Wert des Wassers liefert.

Treibhauseffekt

Als Einstieg in den Begriff "Treibhauseffekt" werden hier 2 einfache Strahlungsmodelle beschrieben. Dazu benötigt man zuerst die Strahlung eines schwarzen Körpers (Hohlraumstrahlung). Sie folgt dem, nach Planck benannten, Naturgesetz

$$S(\lambda, T) = \frac{2\pi^5 c^2 h}{15} \frac{1}{\lambda^5 \left(e^{\frac{hc}{\lambda k T}} - 1 \right)}$$

$$\int_0^\infty S(\lambda, T) d\lambda = \sigma T^4$$

$$\lambda_m T = \frac{ch}{4,9651142k} = 2,8978210^{-3} \text{ mK}$$

$$\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15h^3 c^2} = 5,669210^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^4}$$

c	$2,99793 \cdot 10^8 \text{ m/s}$	Lichtgeschwindigkeit
h	$6,62517 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$	Planck'sche Konstante
k	$1,38044 \cdot 10^{-23} \text{ Js/K}$	Boltzmann Konstante
λ	Wellenlänge der Strahlung	
λ_m	Wellenlänge beim Intensitätsmaximum	
σ	Stefan-Boltzmann Konstante	
$S(\lambda, T)$	Strahlungsleistung [W/m^2] bezogen auf den Querschnitt der Hohlraumöffnung und dem erfassten Wellenlängenintervall	

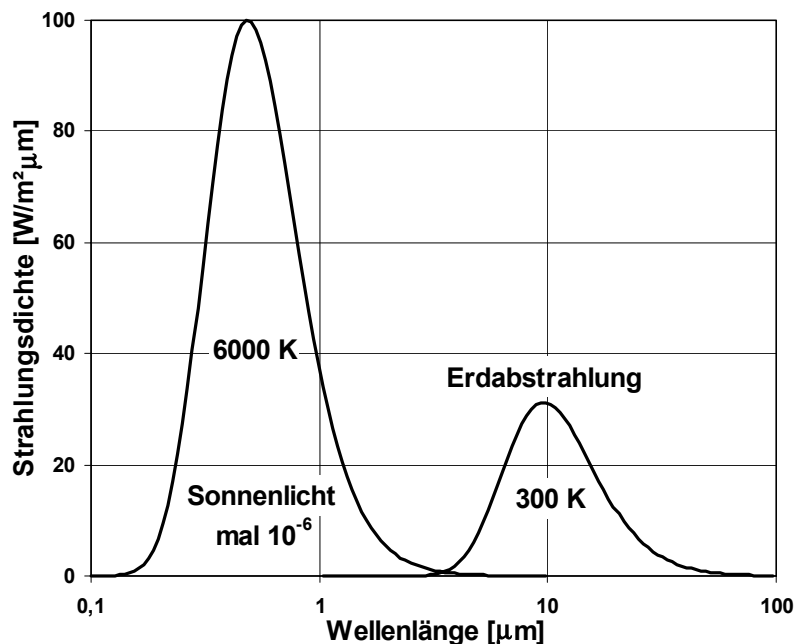


Bild A1: Hohlraumstrahlungen bei 6000 und 300 K, berechnet mit der obigen Formel $S(\lambda, T)$, typisch für die Sonneneinstrahlung und die thermische Erdabstrahlung. Die Hohlraumstrahlung bei 6000 K ist um den Faktor 10^6 verringert, damit sie noch ins Bild passt.

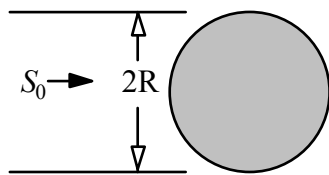
Man stelle sich folgende Übungsaufgabe: Eine Kugel kreist um die Sonne auf einer ähnlichen Bahn wie die Erde. Die Kugel hat keine Atmosphäre und rotiert schnell um die eigene Achse, damit sie gleichmäßig von der Sonnenstrahlung erwärmt wird.

Frage: Wie warm wird die Kugel?

Daten:

S_0	$1353 \pm 27 \text{ W/m}^2$	Solarkonstante mit Variation durch elliptische Erdbahn
r	0,3	Reflektionskoeffizient für die einfallende Strahlung
e	0,95	Emissionskoeffizient für die thermische Abstrahlung

Lösung: Die Kugel empfängt die Sonnenstrahlung nur auf ihrem Querschnitt πR^2 , strahlt aber von der ganzen Oberfläche $4\pi R^2$ Wärme ab. Das Gleichgewicht von Ein- und Abstrahlung liefert

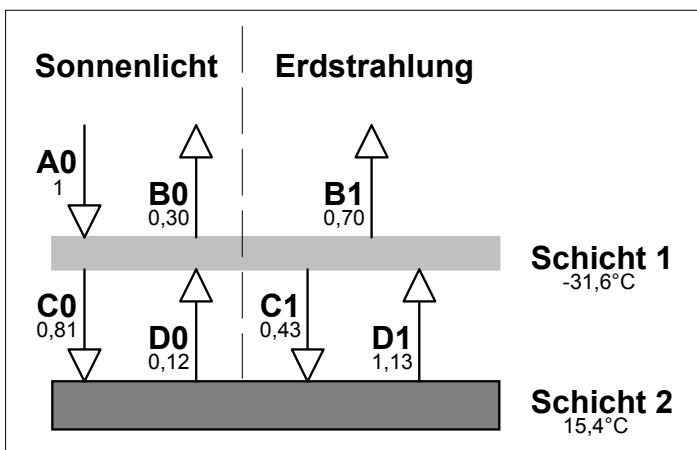


$$S_0 \cdot (1-r) \cdot \pi R^2 = 4\pi R^2 \cdot e \cdot \sigma \cdot T^4$$

$$T^4 = \frac{S_0}{4\sigma} \cdot \frac{1-r}{e}$$

die Temperatur = $257,5 \text{ K} = -15,6^\circ\text{C}$

Ein Treibhauseffekt kann simuliert werden, indem die Kugel mit einer Glasschicht umgeben wird. Es ergibt sich folgendes Modell:



Daten

$$A0 = S_0/4 = 338,25 \text{ W/m}^2$$

		Lambda 0	Lambda 1
Schicht 1	r	0,20	0,01
	a	0,01	0,74
Schicht 2	r	0,15	0,05
	a	0,85	0,95

$r + a + t = 1$ für jede Wellenlänge

Zwischen den Energieflüssen gelten folgende Gleichungen, die sich z.B. mit Excel relativ einfach sequenziell lösen lassen.

Gleichungen

$$A0 = B0 + B1$$

$$C0 + C1 = D0 + D1$$

$$B0 = r_{01} \cdot A0 + t_{01} \cdot D0$$

$$C0 = t_{01} \cdot A0 + r_{01} \cdot D0$$

$$D0 = r_{02} \cdot C0$$

$$S1 = a_{01} \cdot A0 + a_{01} \cdot D0 + a_{11} \cdot D1$$

$$B1 = 0,5 \cdot S1 + t_{11} \cdot D1$$

$$C1 = 0,5 \cdot S1 + r_{11} \cdot D1$$

$$D1 = S2 + r_{12} \cdot C1$$

Strahlungsbilanz oberhalb der Schicht 1

Strahlungsbilanz zwischen den Schichten

Reflexion und Transmission an Schicht 1 der Wellenlänge 0

Transmission und Reflexion an Schicht 1 von Wellenlänge 0

Reflexion an Schicht 2 der Wellenlänge 0

Temperaturstrahlung der Schicht 1 bei Wellenlänge 1

Zusammensetzung von B1

Zusammensetzung von C1

Zusammensetzung von D1

Temperaturen

$$T1 = [0,5 \cdot S1 \cdot A0 / (a_{11} \cdot \sigma)]^{1/4}$$

$$T2 = [S2 \cdot A0 / (a_{12} \cdot \sigma)]^{1/4}$$

Das wesentliche Ergebnis ist der Wärmefluss D1. Er ist größer als die im Tagesmittel einfallende Sonnenstrahlung A0. Das Glas (Schicht 1) absorbiert thermische Strahlung und gibt die Wärme je zur Hälfte zurück zur Kugel (Schicht 2) und ins All. Dadurch wird es gemütlich warm zwischen beiden Schichten.

Der Treibhauseffekt auf der Erde ist komplizierter. 60 bis 80% der Sonnenstrahlung gelangen direkt oder indirekt auf den Erdboden. Dort werden ca. 75% absorbiert, die Ozeane sind ziemlich schwarz. Die absorbierte Strahlung, sei es in der Luft oder auf dem Erdboden, wird mit einer diffusen Temperaturstrahlung von -60 bis +30°C wieder abgegeben. Die unteren Luftschichten sind undurchlässig, d.h. die thermische Strahlung hat eine Reichweite von einigen 100 m. Es stellt sich ein Temperaturgradient ein, der in der Troposphäre durch die polytropische Expansion der feuchten Luft bestimmt ist (Auf- und Abwinde). Dort, wo die relative Luftfeuchte unter 10% bei -50°C sinkt, bildet sich die Tropopause, d.h. der Temperaturgradient dreht sich ins Positive.

Wasserdampf in der Luft erzeugt fast den gesamten Treibhauseffekt. Man geht davon aus, dass der Wasserdampf im schnellen Gleichgewicht mit der feuchten Erdoberfläche steht, und nimmt an, dass die relative Luftfeuchte bei Temperaturänderungen konstant bleibt. Aufgrund dieser Annahme entfällt Wasser (H₂O) in den Tabellen der Treibhauspotentiale.

Die Temperatur der Luft folgt Änderungen der Sonneneinstrahlung mit einer Verzögerung. Die Zeitkonstante ist kurz, etwa ein Monat. Man kennt das von der Tag, Nacht und jahreszeitlichen Temperaturschwankung. Es gibt zusätzlich einen Langzeiteffekt, verursacht durch die Mineralisierung von CO₂, d.h. es bildet sich CaCO₃ (Die Dolomiten bestehen daraus), CO₂-Austausch mit tiefen Schichten in den Ozeanen und durch die Anpassung der Vegetation an die geänderte Temperatur und Luftfeuchte.

Treibhausrelevante Gase wirken über ihre Infrarotabsorption und Verweilzeit in der Luft. Die Wirkung ist um so größer, je stärker die Absorption ist und je länger sich das Gas in der Atmosphäre hält. Kurzlebige Gase, z.B. Kohlenmonoxid (CO), haben einen geringen Treibhauseffekt, sofern sie nicht ständig nachgefüllt werden. Mit kurzlebig sind hier Zeiten unter 10 Jahren gemeint.

Für die Definition des Treibhausäquivalents muss dem Kohlendioxid auch eine Lebensdauer in der Atmosphäre zugeordnet werden. Das ist nicht einfach, weil die lange Zeitkonstante gemeint ist, mit der die CO₂ Konzentration einem Sprung in der solaren Strahlungsleistung folgt. Man nimmt mehr oder weniger willkürlich, nach heutigem Wissen, eine CO₂ Halbwertszeit von 120 Jahren an. Für andere Gase hat man die Infrarotabsorption gemessen und Halbwertszeiten definiert. Daraus können dann die Treibhauspotentiale berechnet werden.

Nun noch ein Beispiel, wie aus den Treibhauspotentialen und den Werten dieser Sachbilanz ein gesamtes Treibhausäquivalent berechnet wird:

Treibhausgas	Treibhaus- potential 100 Jahre	Menge laut Sachbilanz kg	Treibhaus- äquivalent kg CO ₂ äquiv.
CO ₂	1	29732	29732
N ₂ O	320	6,459	2067
R134a (CFH ₂ CF ₃)	1300	1,5	1950
CH ₄	24,5	20,47	502
SF ₆	24900	12,2 · 10 ⁻⁶	0,30
R14 (CF ₄)	6300	20,7 · 10 ⁻⁶	0,13
R116 (C ₂ F ₆)	12500	2,3 · 10 ⁻⁶	0,03
Summe CO₂ Äquivalente			34251