



kWh	9.07E-03
kWh	9.25E-04
kWh	1.95E-03
kWh	8.44E-03
kWh	6.13E-07

Energiebedarf [MJ]

Bereitst. energie

MJ	6.35E-03
MJ	4.44E-03
MJ	8.80E-02
MJ	8.99E-03
MJ	1.80E-02
MJ	9.29E-03
MJ	5.41E-06
MJ	1.35E-01

# Ökobilanz und Energiesparpotential von muskelkraftverstärkenden Zweirädern

am Beispiel des Elektrobikes FLYER

Christian Häuselmann und Cornelia Wolf  
im Auftrag des

- Bundesamtes für Energie
- Wasser- und Energiewirtschaftsamtes  
des Kantons Bern
- Kantonalen Amtes für Industrie,  
Gewerbe und Arbeit des Kantons Bern

Ammoniak (NH<sub>3</sub>)  
Aromatische KW  
Arsen (As)  
Benzol (C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>)  
Blei (Pb)  
CF<sub>4</sub>  
Cadmium (Cd)  
Chlor (Cl)  
Chlorierte KW  
Chrom (Cr)  
Fluorid  
Fluorsäure (HF)  
Halogenierte KW  
Halon 113B1  
Kohlendioxid fossil (CO<sub>2</sub>)  
Kohlendioxid (CO)  
Kohlwasserstoffe (KW)  
Kupfer (Cu)  
Name  
Lachgas (N<sub>2</sub>O)  
Mangan (Mn)  
Metalle  
Methan (CH<sub>4</sub>)  
WOC

1.99E-06	
2.93E-08	4.65E-07
9.48E-05	2.98E-05
1.96E-07	0
9.62E-04	1.69E-05
9.21E-05	4.25E-07
2.18E-06	0
0	5.04E-08
0	0
4.10E-08	0
1.73E-04	0
1.41E-06	0
5.02E-16	0
1.26E-13	8.33E-06
1.05E+00	8.51E-11
1.91E-02	1.91E-07
0	2.60E+00
7.61E-08	1.29E-03
Prozesse	0
6.27E-10	0
4.98E-07	therm.E

## Impressum

**Auftraggeber:**

Bundesamt für Energie  
Wasser- und Energiewirtschaftamt des Kantons Bern  
Kantonales Amt für Industrie, Gewerbe und Arbeit des Kantons Bern

**Auftragnehmer:**

BKTech AG  
3422 Kirchberg

**Autoren:**

Christian Häuselmann  
Cornelia Wolf

Diese Studie wurde im Auftrag des Bundesamtes für Energie und der Kantonalberner Ämter für Wasser und Energiewirtschaft sowie für Industrie, Gewerbe und Arbeit erarbeitet. Für den Inhalt der Studie ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

Vertrieb: BBL/EDMZ, 3003 Bern



„Noch beherrscht der Benzinmotor das Feld der Kraftwagen und Kraftfahräder, und für absehbare Zeit wird ihm kein anderer Motor die Herrschaft ernsthaft streitig machen, aber doch hört man schon vielfach die Nachteile des Benzinmotors hervorheben, nämlich dass er einen unangenehmen Geruch verbreite, an störender Unsauberkeit leide, nicht stossfrei arbeite und mancherlei unbequeme Geräusche verursache.“

*Das neue Universum, 1918*

„Paris. Wegen des anhaltenden Smogalarms sind in Paris die Fahrpreise der öffentlichen Verkehrsmittel halbiert worden. Die derzeitige Hitze und Autoabgase führen seit einer Woche in der französischen Hauptstadt zu hohen Ozonwerten. Die Polizei hat die Höchstgeschwindigkeiten auf vielen Strassen heruntergesetzt.“

*DER BUND, 22. August 1997*

# Inhalt

	Seite
<b>Kurzfassung</b>	<b>5</b>
<b>Version courte</b>	<b>12</b>
<b>Short version</b>	<b>20</b>
 <b>1. Einleitung</b>	 <b>27</b>
1.1 Ausgangslage	27
1.2 Der FLYER	29
1.3 Ziele der Studie	30
1.4 Aufbau der Studie	31
 <b>2. Methodik</b>	 <b>32</b>
2.1 Ökobilanz	32
2.2 Definitionen und Begriffe	34
2.2.1 Energie	34
2.2.2 Entsorgung	35
2.2.3 Recycling	35
2.2.4 Diverses	35
2.3 Ziel der durchgeführten Ökobilanz	36
2.4 Systemgrenze	36
2.5 Bezugsgrösse	38
2.6 Recycling	38
2.7 Methoden zur Auswertung	40
2.7.1 Wirkungsorientierte Klassifizierung	40
2.7.2 Immissionsgrenzwertmethode	42
2.7.3 Methode der ökologischen Knappheit	42
2.8 Angaben zur Methodik der Umfrage bei FLYER-KundInnen	43
 <b>3. Inputdaten FLYER</b>	 <b>44</b>
3.1 Einleitende Bemerkungen	44
3.2 Herstellung	46
3.2.1 Fahrrad	47
3.2.2 Blei- und Nickel-Cadmium-Akkumulatoren	48
3.2.3 Motor, Rahmenkoffer, Tretlager, Getriebe, übrige Teile	49
3.2.4 Elektronik	49
3.3 Betrieb	50
3.3.1 Stromverbrauch	50
3.3.2 Energieverbrauch FLYER-FahrerIn	51
3.4 Unterhalt	51
3.4.1 Akkumulatoren	51
3.4.2 Verschleissteile	52
3.5 Entsorgung	53
3.5.1 Recycling der Akkumulatoren	53
3.5.2 Elektronikschrott	58
3.5.3 Entsorgung der übrigen Teile	60
3.6 Verknüpfung mit Ökoinventaren	61



<b>4.</b>	<b>Inputdaten Substitutionsfahrzeuge</b>	<b>64</b>
4.1	Fahrrad	64
4.2	Motorisierte Zweiräder	64
4.3	PW, Regionalbus, Tram, Regionalzug	67
<b>5.</b>	<b>Auswertung</b>	<b>69</b>
5.1	Vergleich von Schlüsselgrößen	69
5.1.1	Vergleich FLYER Pb und NiCd	69
a)	Energie	69
b)	Abfälle	72
c)	Schwefeldioxid	73
d)	Ist der FLYER Pb umweltfreundlicher als der FLYER NiCd?	74
5.1.2	Vergleich des FLYERs mit Substitutionsfahrzeugen	75
a)	Energie	75
	Exkurs: Lebensfahrleistung und Auslastung	79
b)	Luftschadstoffe	81
c)	Abfälle	87
5.2	Vergleich mittels Bewertungsmethoden	88
5.2.1	Wirkungsorientierte Klassifizierung	88
5.2.2	Immissionsgrenzwertmethode	92
5.2.3	Methode der ökologischen Knappheit	93
5.3	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	94
5.4	Szenario Solarstrom	98
<b>6.</b>	<b>Energiesparpotential</b>	<b>100</b>
6.1	Ist-Zustand	100
6.1.1	Energieverbrauch mit und ohne Einsatz des FLYERs Pb	103
6.1.2	Luftemissionen mit und ohne Einsatz des FLYERs Pb	105
6.2	Szenario 2003	106
<b>7.</b>	<b>Literaturliste</b>	<b>109</b>
<b>8.</b>	<b>Verzeichnis der Tabellen und Abbildungen</b>	<b>112</b>
	<b>Anhangsübersicht</b>	<b>114</b>
<b>Anhang 1</b>	Inputdaten FLYER und Substitutionsfahrzeuge	115
<b>Anhang 2</b>	Zusammengefasste Resultatetabelle pro Personenkilometer	121
<b>Anhang 3</b>	Einsparungen an Energie und Luftemissionen durch den Einsatz von FLYERn, heute und im Jahr 2003	122

## Kurzfassung

**Innovative und umweltorientierte Mobilitätskonzepte** sind gefragt. Als neues Verkehrsmittel werden Elektrobikes, die die eigene Muskelkraft verstärken, weltweit zum Thema: Elektrobikes bieten im täglichen Nahverkehr echten Zusatznutzen gegenüber anderen Verkehrsmitteln. Die Entwicklungen auf diesem Gebiet zeigen, dass Elektrobikes in den nächsten Jahren im Strassenverkehr zur Selbstverständlichkeit werden dürften.

**Die vorliegende Studie** gibt anhand des FLYER Elektrobikes Antworten auf die Frage, ob der Einsatz von muskelkraftverstärkenden Zweirädern aus ökologischer Sicht überhaupt sinnvoll und förderungswürdig ist. Vor allem drei Akteurguppen sind an diesen Informationen interessiert:

- Einerseits stehen umweltorientierte **KonsumentInnen** vor dem Problem, die Fülle an neuen Verkehrsmitteln und -formen zu bewerten: Stellt ein neues Verkehrsmittel wirklich auch eine ökologisch sinnvollere Alternative zu bestehenden Lösungen dar? Oder werden damit Umweltbelastungen einfach räumlich und zeitlich verlagert? Werden gar zusätzliche Mobilitätsbedürfnisse geschaffen? Gerade bei Leichtelektromobilen (LEM) sind diese Fragen immer wieder Gegenstand der öffentlichen Diskussion.
- Auf der Seite des **Herstellers** ist für die BKTech AG als Entwicklungs-, Produktions- und Vertriebsfirma mit hohen Umweltansprüchen von Bedeutung, wie die Ökobilanz des FLYERs aussieht. Wo sind Verbesserungspotentiale vorhanden? Welche Verkehrsmittel werden durch FLYER-Fahrten ersetzt? Welche Energiespareffekte sind zu erwarten, wenn Elektrobikes in grösseren Stückzahlen eingesetzt werden?
- Von Seite der **öffentlichen Hand** und **politischen Institutionen** ist zu fragen, ob durch diese Fahrzeuge neuer Handlungsbedarf entsteht: Wie sind diese neuen Verkehrsmittel in politische Prozesse einzubinden? Wie beeinflussen diese innovativen Fahrzeuge zukünftige Entscheide zur Förderung einer neuen Mobilität?

Die Studie verfolgt drei Ziele:

1. Erstellung der **Ökobilanz** des FLYER Elektrobikes sowie der Substitutionsfahrzeuge
2. Schätzung des **Verlagerungs- bzw. Substitutionspotentials** des FLYERs
3. Berechnung der **Umwelteffekte**, insbesondere der durch den Einsatz des FLYERs erreichbaren Energiesparpotentiale.

**Mit der Methodik der Ökobilanzierung** sollen möglichst objektiv und umfassend die Umweltauswirkungen analysiert werden, die durch den FLYER entstehen. Zu beachten ist, dass die Ergebnisse einer Ökobilanzierung nicht als absolut betrachtet werden dürfen und immer vor dem Hintergrund der Annahmen und Rahmenbedingungen zu verstehen sind, unter welchen die Ökobilanzierung entstanden ist. Die Ergebnisse werden mit der Bezugsgrösse Personenkilometer dargestellt (d.h. die Beförderung einer Person über einen Kilometer).

## Wichtigste Ergebnisse der Studie

### 1. Vergleich des FLYER Pb und des FLYER NiCd

Ist der mit Blei-Gel-Akkumulatoren ausgerüstete FLYER (FLYER Pb) dem in Zukunft eventuell mit Nickel-Cadmium-Akkumulatoren ausgerüsteten FLYER (FLYER NiCd) aufgrund von Umweltkriterien vorzuziehen oder eben gerade nicht? Als Ergebnis lässt sich bezüglich Energie, Abfälle und Luftemissionen folgendes festhalten:

**ENERGIE:** Die gesamte Herstellung **eines Satzes** Nickel-Cadmium-Akkumulatoren (beim FLYER entspricht ein Akku-Satz zwei Akkumulatoren) braucht wegen der aufwendigen Materialbereitstellung des Nickels mehr Energie als die Herstellung eines Satzes Bleiakumulatoren.

Wird die **Gesamtlebensdauer** der Akkumulatoren betrachtet, kehrt sich dieses Verhältnis für den Einsatz beim FLYER gerade um: Durch die höhere Lebensdauer der Nickel-Cadmium-Akkumulatoren (setzt effizientes, zur Zeit auf dem Markt nicht erhältliches Akku-Management voraus) müssen diese weniger oft ersetzt werden und brauchen deshalb für die Herstellung insgesamt pro Personenkilometer weniger Energie als die Bleiakumulatoren.

**ABFÄLLE:** Der grösste Anteil des Abfalls entsteht beim Erzabbau in Form von Abraum. Die Bleiakumulatoren verursachen **pro Personenkilometer** fast doppelt soviel Abraum und andere Abfälle als die NiCd-Akkumulatoren.

**LUFTEMISSIONEN:** Bei den untersuchten Luftemissionen weisen die beiden FLYER-Modelle praktisch identische Werte auf - ausser beim **Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>)**. Der FLYER Pb weist beim SO<sub>2</sub> deutlich bessere Werte auf als der FLYER NiCd, da die Schwefeldioxid-Emissionen bei Akkumulatoren fast ausschliesslich aus der Verhüttung des Nickels stammen.

**Fazit:** Die Ergebnisse basieren auf ungenauen Daten bezüglich Erzabbau und Erzverarbeitung. Auch die Toxizität für Mensch und Umwelt konnte aufgrund mangelnder Daten zu den Emissionen von Blei, Nickel und Cadmium bei Herstellung und Recycling nicht berücksichtigt werden.

Unter Berücksichtigung des heutigen Stands der Technik, der verfügbaren Informationen und der in dieser Studie getroffenen Annahmen ist der FLYER Pb dem FLYER NiCd vorzuziehen. Dies ändert sich, sobald ein effizientes Akkumanagementsystem für NiCd-Akkus angeboten und damit die Lebensdauer der NiCd-Akkus entscheidend erhöht werden kann.



## 2. Vergleich des FLYERs mit Substitutionsfahrzeugen

Interessant wird der Einsatz des FLYERs vor allem dann, wenn mit FLYER-Fahrten Fahrzeuge mit höheren Umweltbelastungen ersetzt werden können.

Grundlage für den Vergleich verschiedener Fahrzeuge sind unter anderem die Annahmen bezüglich der Auslastungszahlen. Für die Umrechnung in Personenkilometer wird im Ökoinventar Transporte mit den heutigen in der Schweiz geltenden durchschnittlichen Auslastungen gerechnet. In Tabelle A sind die entsprechenden Zahlen für die bilanzierten Fahrzeuge dargestellt.

Verkehrsmittel	Auslastung		Kapazität
	absolut Personen	Relativ	
PW	1.72	34%	5
Regionalbus	16.4	41%	40
Tram	28	18%	160
Regionalzug	32	17%	193

Tabelle A: Auslastung und Kapazität von PW, Regionalbus, Tram und Regionalzug

Abbildung A zeigt den Primärenergieverbrauch pro Personenkilometer der in dieser Studie betrachteten Fahrzeuge, aufgeteilt nach erneuerbarer und nicht-erneuerbarer Energie. In Abbildung B ist der Energieverbrauch pro Personenkilometer aufgeteilt nach Betriebsenergie, Bereitstellung der Betriebsenergie und restliche Energie (d.h. Herstellung, Unterhalt und Entsorgung der Fahrzeuge).

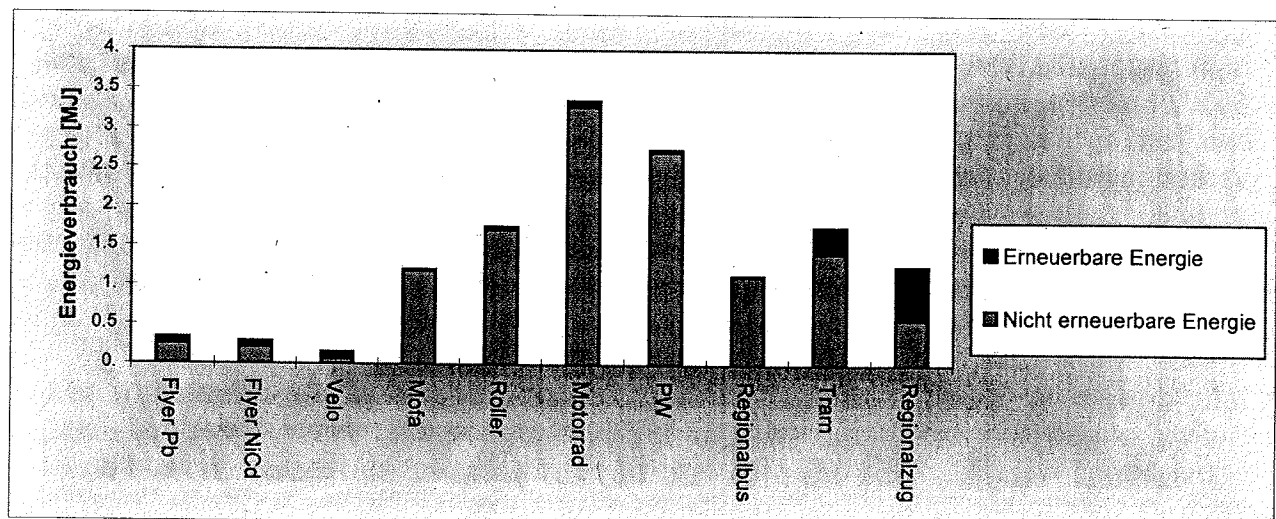


Abbildung A: Energieverbrauch pro Personenkilometer

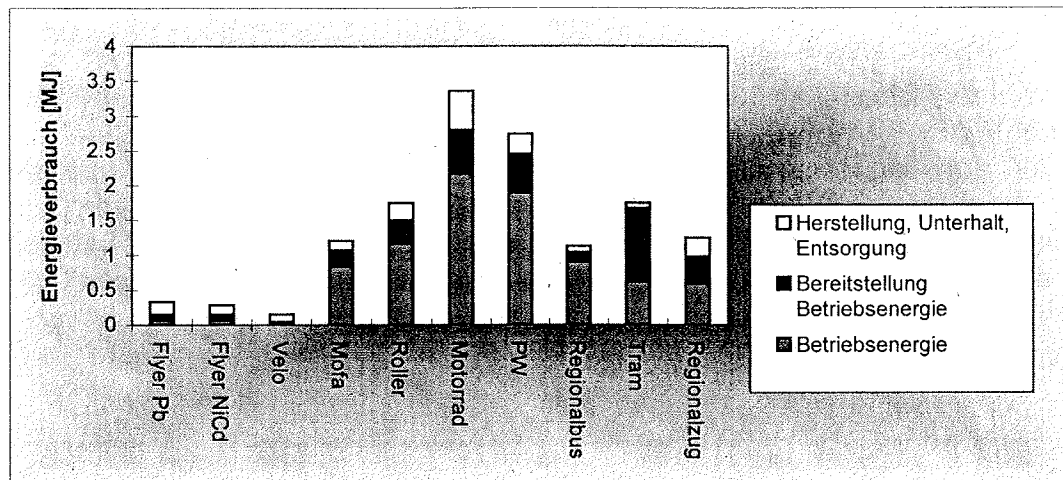


Abbildung B: Energieverbrauch pro Personenkilometer

Der Vergleich des FLYERs und der Substitutionsfahrzeuge bezüglich Energie, Luftschadstoffe und Abfälle ergibt folgende Resultate:

**ENERGIE:** Der gesamte Energieverbrauch pro Personenkilometer ist beim FLYER, abgesehen vom Fahrrad, mit Abstand am geringsten. Wie bei allen Verkehrsmitteln mit Elektroantrieb ist auch beim FLYER der Anteil an erneuerbarer Energie verhältnismässig hoch (der Schweizer Strommix enthält einen hohen Anteil an Wasserkraft).

Beim FLYER wird für den Betrieb ein vergleichsweise geringer Anteil der Gesamtenergie verbraucht.

**LUFTSCHADSTOFFE:** Bezüglich aller betrachteten Luftschadstoffe erzeugt der FLYER nach dem Fahrrad die geringsten Emissionen.

Nur bei den durch den FLYER verursachten radioaktiven Substanzen wird eine verhältnismässig hohe Menge emittiert, da der Schweizer Strommix 50% Kernkraft enthält.

**ABFÄLLE:** Bei den Abfällen können aufgrund der verfügbaren Informationen keine sinnvollen Aussagen gemacht werden.

**Mit den drei Bewertungsmethoden** wirkungsorientierte Klassifizierung (d.h. Auswirkungen auf Treibhauseffekt, Überdüngung, Versauerung, Ozonabbau, etc.), Immissionsgrenzwertmethode und Methode der ökologischen Knappheit lassen sich beim Vergleich des FLYERs mit Substitutionsfahrzeugen folgende Schlüsse ziehen:

- Für die Ökobilanz der beiden FLYER-Modelle ist die umweltgerechte Produktion und Entsorgung der Akkumulatoren ein entscheidender Faktor.
- Mit dem heutigen Stand der Ladegeräte - die bei NiCd-Akkumulatoren nicht 800 bis 1'000 Zyklen garantieren - ist der FLYER Pb dem FLYER NiCd vorzuziehen.

- Die Methode der ökologischen Knappheit zeigt, dass die Luftbelastung mit Abstand zu den meisten Umweltbelastungspunkten führt. Der Energieverbrauch hat einen Anteil von rund 10% an den Umweltbelastungspunkten, die Wasserbelastung ist hundert- bis tausendmal geringer als die Luftbelastung.
- Im Vergleich zu den Substitutionsfahrzeugen erreicht der FLYER bei allen Betrachtungsweisen sehr gute Werte. Nur das Fahrrad belastet erwartungsgemäss die Umwelt in allen Bereichen weniger. Es darf also nicht das Ziel sein, mit dem FLYER hauptsächlich Fahrradfahrten zu ersetzen. Der Ersatz aller sonst in dieser Studie bilanzierten Fahrzeuge durch den FLYER ist jedoch sinnvoll und führt zu einer Umweltentlastung.
- Primär sollten Individualverkehrsmittel wie Personenwagen, Motorrad, Roller und Mofa mit dem FLYER ersetzt werden. Der Ersatz von öffentlichen Verkehrsmitteln ist sekundär anzustreben. Bereits heute wird erfreulicherweise der FLYER tendenziell klar in diesem Sinne eingesetzt.

### 3. Substitutionspotential, Umwelteffekte und Energiesparpotential

Die **Breite des Substitutionspotentials** darf als überraschend und wegweisend für die Zukunft bezeichnet werden. Bisher wurde meistens davon ausgegangen, dass mit muskelkraftverstärkenden Zweirädern primär Fahrradfahrten ersetzt werden. Diese Annahme wird mit der vorliegenden Studie widerlegt. Abbildung C zeigt die Anteile der mit FLYER-Fahrten zur Zeit der KundInnenbefragung (n=53) ersetzten Verkehrsmittel.

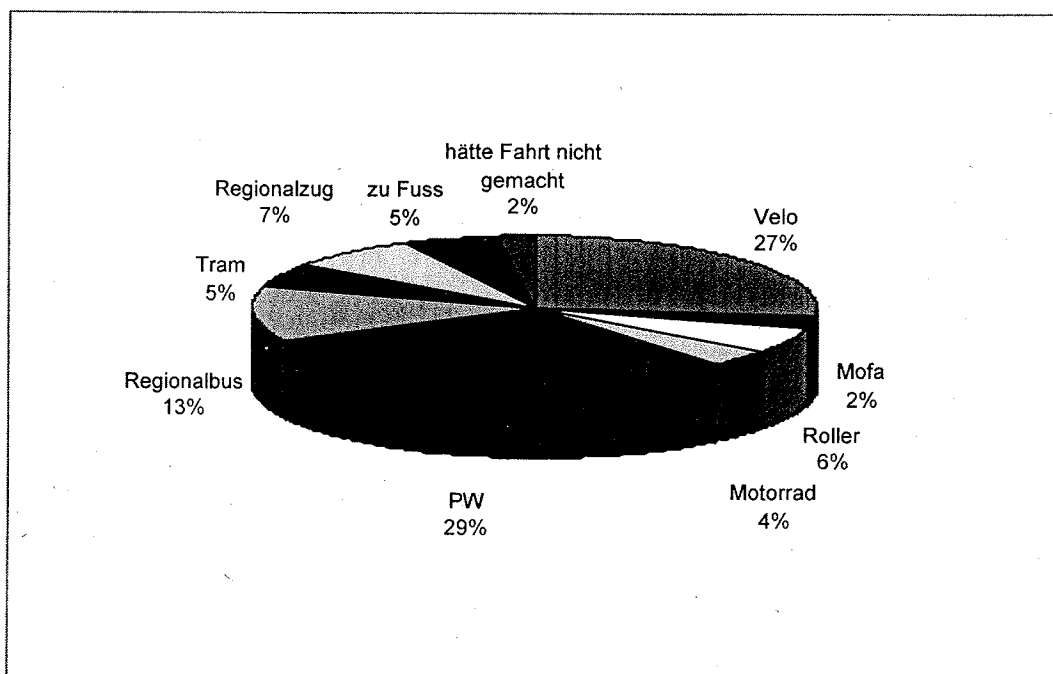


Abbildung C: Anteile der ersetzten Fahrzeuge (Befragung 1996)



Die 53 befragten Personen ersetzen also mit dem FLYER zu

- 29% das Auto
- 27% das Fahrrad
- 25% den öffentlichen Verkehr
- 12% Mofa, Roller, Motorrad (vgl. Abbildung C).

Erfreulich ist, dass praktisch keine zusätzliche Mobilität verursacht wird - die Grundidee des FLYERs als nützliches Alltagsverkehrsmittel wird somit nicht nur von den Entwicklern, sondern auch von den FLYER-FahrerInnen getragen. Zu bemerken ist, dass diese Daten nicht als repräsentativ für die Gesamtbevölkerung betrachtet werden dürfen – die heutigen FLYER-FahrerInnen weisen ein überdurchschnittliches Verständnis für Mobilitäts-, Energie- und Umweltfragen auf.

**Folgende Umwelteffekte und Energiesparpotentiale** lassen sich durch den Einsatz der 53 zur Zeit der Befragung in Betrieb stehenden FLYER erreichen (Auswahl von Resultaten):

- Das Gesamttotal der Einsparungen an erneuerbaren und nicht erneuerbaren Energieträgern beträgt bei 53 FLYERn rund 2'300'000 MJ (bei einer Gesamtlebensdauer von 40'000 km pro FLYER – d.h. in dieser Zeitspanne lohnt es sich, defekte Teile wieder zu ersetzen). Dies entspricht z.B.:
  - der durchschnittlichen Jahresproduktion eines Solarkraftwerkes mit 6'000 m<sup>2</sup> Fläche Solarzellen (knapp so gross wie zwei Drittel eines Fussballfelds) oder
  - dem Jahresenergieverbrauch von 250 Schweizer Haushalten (ohne elektrische Boiler).
- Pro Personenkilometer wird mit 1,088 MJ die Energie gespart, mit der das Wasser für rund 1 Minute warm Duschen geheizt werden kann.
- Die 44'218 kg Rohöl ab Bohrloch, die mit den 53 FLYERn während ihrer Lebenszeit eingespart werden, entsprechen dem Inhalt von rund 265 Ölfässern.
- Der eingesparte CO<sub>2</sub>-Ausstoss von rund 134 Tonnen entspricht dem Ausstoss von 25 Personenwagen in einem Jahr (bei einer angenommenen Fahrleistung von 17'000 km und einem Verbrauch von 9,4 Litern auf 100 km).

**In einem Szenario für das Jahr 2003** wird der Blick in die Zukunft gerichtet. Die Marktentwicklung von muskelkraftverstärkenden Zweirädern steht erst am Anfang. Es stellt sich die Frage, welche Umwelteffekte zu erwarten sind, wenn dieses neue Verkehrsmittel als Massenprodukt eingesetzt wird.

Im Szenario 2003 wird erstens von den Werten des FLYER NiCd ausgegangen und zweitens das Substitutionspotential bzw. die prozentuale Verteilung der durch FLYER-Fahrten ersetzten Fahrzeuge so angepasst, dass sie als realistische Schätzung für eine breite Bevölkerung gelten können. Folgende Verteilung der Substitutionsfahrzeuge wird angenommen:

- 33% Fahrräder
- 25% Autos
- 25% Öffentlicher Verkehr
- 15% Roller/Motorräder
- 2% Diverse (zu Fuss, zusätzliche Mobilität, etc.)

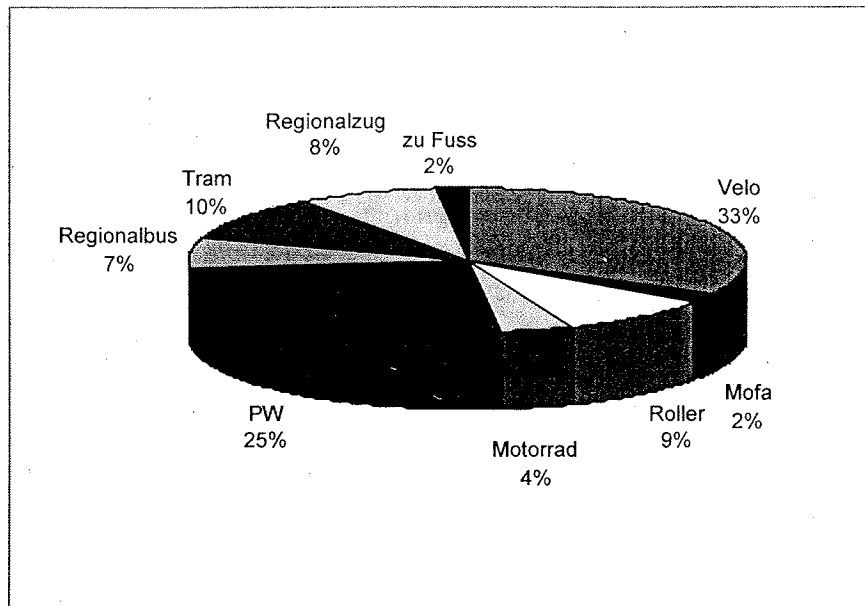


Abbildung D: Anteile der ersetzten Fahrzeuge (Szenario 2003)

Unter sonst gleichbleibenden Annahmen und Bedingungen werden die Berechnungen, wie sie für 53 FLYER Pb durchgeführt wurden, im Szenario 2003 für 10'000 FLYER NiCd bzw. FLYER-ähnliche Elektrobikes durchgeführt. Es ergeben sich folgende Umweltentlastungen:

- Das Gesamttotal der Einsparungen an erneuerbaren und nicht erneuerbaren Energieträgern beträgt 445'559'200 MJ. Dies entspricht z.B.:
  - der durchschnittlichen Jahresproduktion eines Solarkraftwerkes mit rund 1'162'000 m<sup>2</sup> Fläche Solarzellen (etwa so gross wie 120 Fussballfelder) oder
  - dem Jahresenergieverbrauch von 4'450 Schweizer Haushalten (ohne elektrische Boiler).
- Die 8'048'188 kg Rohöl ab Bohrloch, die mit den 10'000 Fahrzeugen während ihrer Lebenszeit eingespart werden, entsprechen dem Inhalt von rund 48'289 Ölfässern.
- Der eingesparte CO<sub>2</sub>-Ausstoss von rund 24'320 Tonnen entspricht dem Ausstoss von 4'615 Personenwagen in einem Jahr (bei einer angenommenen Fahrleistung von 17'000 km und einem Verbrauch von 9,4 Litern auf 100 km).

**Neben den realen Umweltentlastungen** durch den Einsatz von muskelkraftverstärkenden Zweirädern kommt ein wichtiger Effekt hinzu: Das innovative Verkehrsmittel regt als Nebeneffekt weiterführende Denkprozesse an. Das bisherige Mobilitätsverhalten wird hinterfragt, ein neues Mobilitäts- und Energieverständnis entsteht.

## La version courte

**Des brouillons de la mobilité d'innovation orientés sur l'environnement** sont demandés. Le sujet sera les bicyclettes en batterie qui fortifient la propre force musculaire comme nouveau moyen de circulation : les bicyclettes en batterie offrent vraiment un moyen de circulation supplémentaire en face d'autres moyens de circulation. Les développements sur le marché concernant ce domaine montrent que les bicyclettes en batterie seront probablement évidentes dans la circulation routière au cours des années.

**L'étude présente** à propos des bicyclettes en batterie réponses à la question si la mise en service des bicyclettes qui fortifient la force musculaire est dans la perspective écologique après tout rationnelle et digne d'un encouragement. Trois groupes d'acteurs sont surtout intéressés à ces informations:

- D'une part ce sont **les consommateurs** orientés sur l'environnement qui estiment la grande quantité de nouveaux moyens et formes de circulation. Est-ce qu'un nouveau moyen de circulation représente vraiment une alternative écologique plus raisonnable par rapport aux solutions existantes ? Ou est-ce qu'on déplace des incidences sur l'environnement temporel et spatial avec ce nouveau moyen de la circulation ? Est-ce qu'on créera même de nouveaux besoins de la mobilité supplémentaire ? Ces questions sont toujours le sujet aux discussions publiques.
- De la part **du fabricant** le bilan écologique des FLYER est important pour la BKTech AG comme entreprise du développement, de la production et de la distribution avec des hautes exigences de l'environnement. Où sont des potentiels d'amélioration disponibles ? Quel moyen de circulation sera remplacé par les trajets du FLYER ? Quels effets d'économie de l'énergie seront attendus quand des bicyclettes seront mises en service en gros nombre des pièces ?
- De la part **des collectivités publiques et des institutions politiques** on se demande si un besoin de commerce de ce nouveau véhicule naîtra ? Comment des nouveaux véhicules sont-ils à introduire dans des procès politiques ? Quelle influence auront ces nouveaux véhicules dans des décisions concernant l'encouragement d'une nouvelle mobilité à l'avenir ?

L'étude envisage trois objectives:

1. Dresser un bilan écologique du FLYER (bicyclette en batterie) ainsi que des véhicules de substitution.
2. Estimation du potentiel du déplacement et de la substitution du FLYER
3. Calcul des effets sur l'environnement surtout le potentiel d'économie de l'énergie par la mise en service du FLYER

Avec la méthodologie d'un établissement du bilan écologique les effets sur l'environnement résultats du FLYER doivent aussi être analysés le plus objectivement et le plus vastement possible. Il est à considérer que les résultats d'un établissement



du bilan ne doivent pas être considérés comme absolu et qu'ils sont toujours à comprendre en rapport avec des suppositions et des conditions générales avec lesquelles l'établissement du bilan était dressé. Les résultats sont démontrés en longueur du kilomètre de personne, ça veut dire le transport d'une personne tout le long d'un kilomètre.

## Les résultats les plus importants de l'étude

### 1. Comparaison du FLYER Pb avec le FLYER NiCd

Est-ce que le FLYER équipé d'un accumulateur de plomb-gel (FLYER Pb) est ou n'est justement pas préférable au FLYER équipé d'un accumulateur de nickel-cadmium (FLYER NiCd) à cause des critères d'environnement.

En considérant l'énergie, les déchets et les émissions de l'air on résume:

**L'énergie:** la fabrication totale d'une série des accumulateurs de nickel-cadmium (une série d'accu correspond à deux accumulateurs d'un FLYER) a besoin plus d'énergie que la production d'une série des accumulateurs de plomb à cause de la mise à disposition des matériels de nickel.

En considérant la durée d'utilisation des accumulateurs la situation concernant le FLYER est complètement envers: grâce à sa longue durée d'utilisation des accumulateurs de nickel-cadmium (présume un accu-management pas encore disponible sur le marché pour l'instant) doivent être remplacés moins souvent et c'est pourquoi ils ont besoin moins d'énergie pour la production que les accumulateurs de plomb.

**Déchets:** la part la plus grande des déchets se produit pendant l'exploitation des minerais en forme des décombres. Des accumulateurs de plomb causent le double des décombres par kilomètre de personne et d'autres déchets que des accumulateurs de NiCd.

**Missions d'air:** lors des missions d'air les deux modèles FLYER montrent pratiquement la même valeur sauf concernant le dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>). Le FLYER Pb montre clairement une meilleure valeur que le FLYER NiCd car l'émission de dioxyde de soufre des accumulateurs résulte presque exclusivement de la fabrication de nickel.

**Résultat:** les résultats se basent sur des données inexactes concernant d'exploitation de minerai et de traitement de minerai. Aussi la toxicité pour un être humain ne pouvait non plus être considérée à cause des données des émissions du plomb, du nickel et du cadmium pendant la fabrication et le recyclage qui manquent. En considération d'état de la technique d'aujourd'hui et des informations disponibles et des suppositions prises de cette étude le FLYER Pb est préférable au FLYER NiCd. La situation changera dès qu'un système de management pour un accu-NiCd sera sur le marché et avec cela la durée d'utilisation d'un accu NiCd sera considérablement augmentée.

## 2. Comparaison du FLYER avec les véhicules de substitution

La mise en service des FLYER deviendra surtout intéressante si des trajets avec le FLYER peuvent remplacer des véhicules avec une plus haute incidence sur l'environnement.

La base pour la comparaison de différents véhicules sont entre autres les suppositions concernant le degré de l'occupation (ça veut dire l'utilisation). Pour la conversion en kilomètre de personne on compte à l'inventaire écologique des transports avec les chiffres de l'utilisation valables aujourd'hui en Suisse. Le tableau A présente les chiffres des véhicules du bilan.

Moyen de circulation	Utilisation		capacité
	absolu (personnes)	relatif	
voiture	1.72	34%	5
bus régional	16.4	41%	40
tram	28	18%	160
train régional	32	17%	193

tableau A : utilisation et capacité de différents moyens de circulation

L'illustration A montre la consommation d'énergie primaire par kilomètre de personne des véhicules considérés dans cette étude. Elle est partagée après d'énergie renouvelable et non-renouvelable. Dans l'illustration B la consommation d'énergie par kilomètre de personne est partagée entre l'énergie d'exploitation mise à la disposition et l'énergie d'exploitation et l'énergie qui reste ( ça veut dire production, entretien et élimination des véhicules).

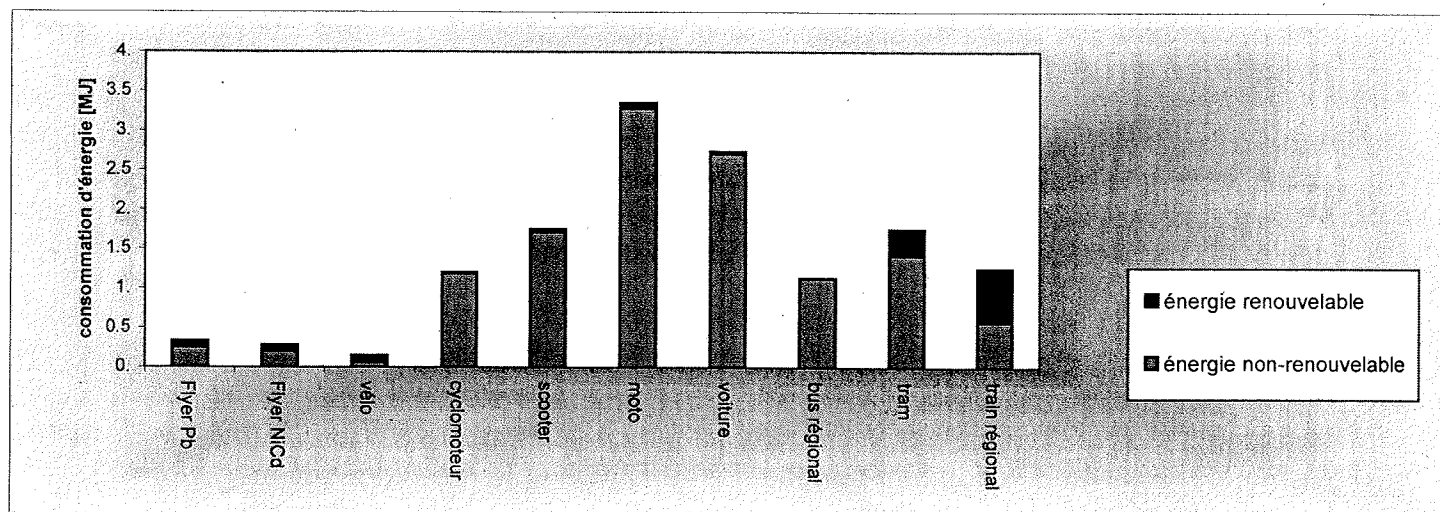


illustration A : consommation d'énergie par kilomètre de personne

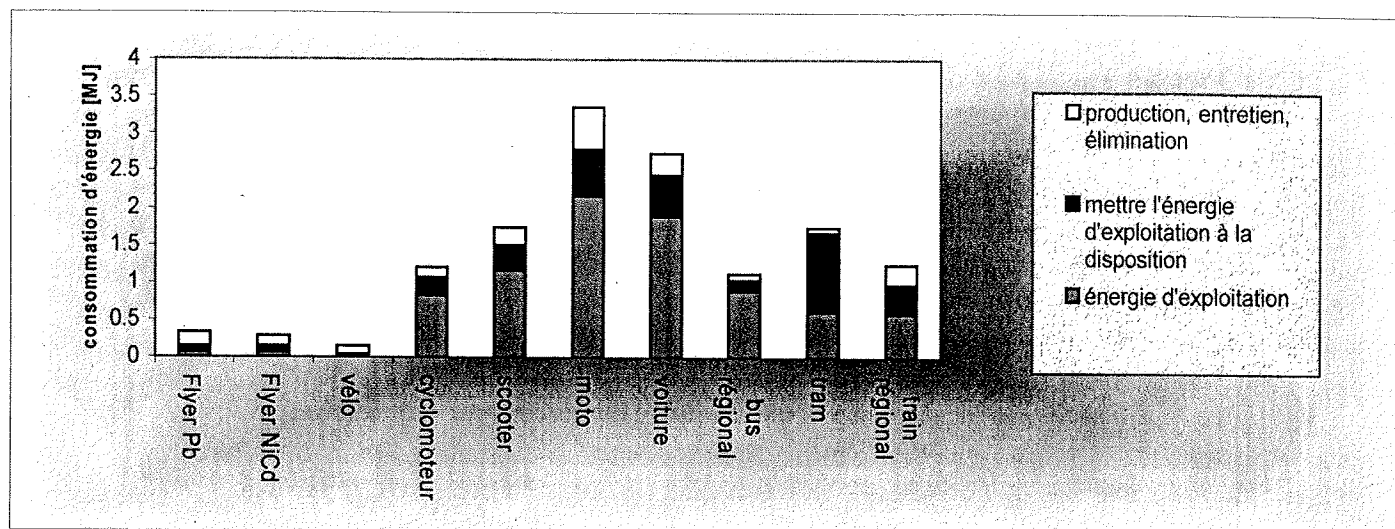


illustration B : consommation d'énergie par kilomètre de personne

La comparaison du FLYER avec les véhicules de substitution concernant l'énergie, la pollution d'air et les déchets donne des résultats suivants:

**L'énergie:** le FLYER a la moindre consommation d'énergie par kilomètre de personne à part du vélo. Comme avec tous les moyens de la circulation avec une commande électrique la part de l'énergie renouvelable du FLYER est relativement grande ( la mixture électrique suisse a une grande part de la force puissance hydraulique). Le FLYER consomme comparativement une petite part de l'énergie totale pour la mise en service.

**La pollution d'air:** concernant toutes pollutions d'air le FLYER produit les moindres émissions après le vélo. Mais en considération des substances radioactives causées par le FLYER, il émet comparativement une grosse quantité car la mixture d'énergie suisse contient 50% d'énergie nucléaire.

**Les déchets:** en raison des informations présentes il n'est pas possible de donner une déclaration raisionnable.

**Avec les trois méthodes d'évaluation** de la classification orientée sur l'efficacité (ça veut dire l'effet sur l'effet de serre, sur le fumage en haute quantité, l'acidité, l'exploitation d'ozone, etc.), la méthode de la valeur limite d'imission et la méthode de la modicité écologique on peut résumer en comparaisant le FLYER avec les véhicules de substitution:

- la production et l'élimination favorables à l'environnement sont très importantes pour le bilan écologique des deux modèles de FLYER.
- les appareils de chargement du niveau d'aujourd'hui (qui ne peuvent pas garantir de 800 jusqu'à 1000 cycles pour les accumulateurs NiCd) le FLYER Pb est préférable au FLYER NiCd.



- la méthode de la modicité écologique montre que l'incidence sur l'air mène à la plupart des points de l'incidence sur l'environnement. La consommation de l'énergie a une part d'environ 10% à l'incidence sur l'environnement, l'incidence sur l'eau est 100 jusqu'à 1000 fois moindre que l'incidence sur l'air.
- le FLYER atteint dans toutes les manières de voir des valeurs meilleures en comparaison avec les autres véhicules de substitution. Comme attendu seul le vélo charge moins l'environnement. Donc le but n'est pas de remplacer le vélo par le FLYER. Mais il est recommandable de remplacer tous les autres véhicules mentionnés au bilan par le FLYER et cela mène à un soulagement de l'environnement.
- premièrement les véhicules individuels comme les voitures, les motos, les scooters et les cyclomoteurs doivent être remplacés par le FLYER. Le remplacement des transports publics est secondairement envisageable. Heureusement le FLYER est déjà aujourd'hui utilisé clairement dans ce sens.

### 3. Le potentiel de substitution, les effets sur l'environnement et le potentiel d'économie de l'énergie

On peut appeler cette étendue du potentiel de substitution comme surprenante et indiquante pour l'avenir. Jusqu'à présent on a supposé que les bicyclettes qui fortifient la force musculaire remplacent avant tout les trajets de vélo. Mais cette supposition est réfutée par l'étude présente. L'illustration C montre la part des véhicules remplacés par les trajets avec le FLYER selon le sondage (n=53).

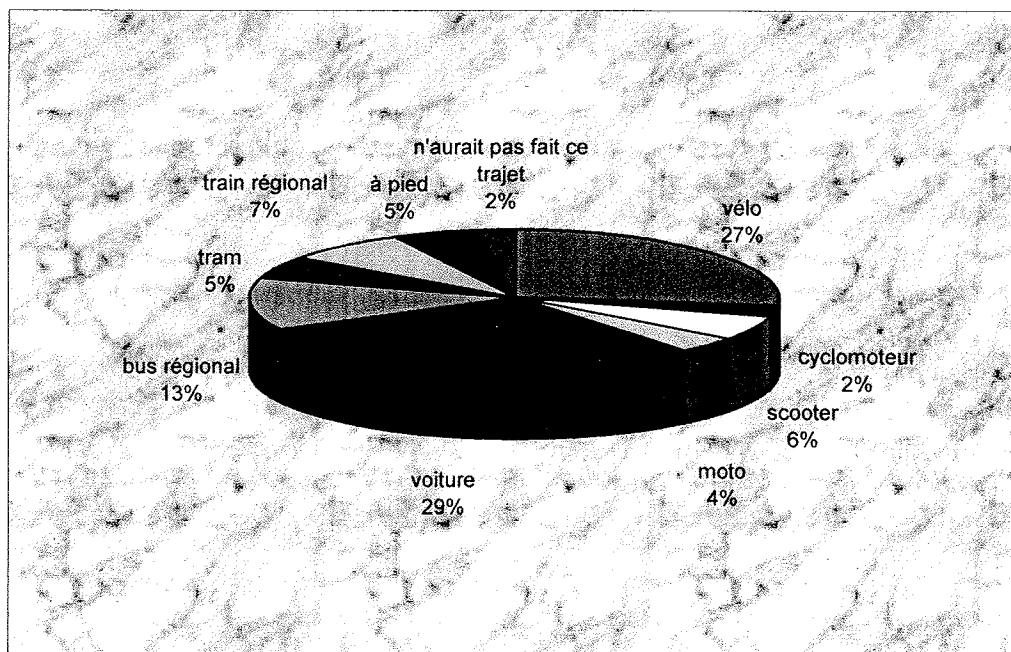


illustration C : la part des véhicules remplacés (sondage de 1996)

Donc les 53 personnes remplacent avec

- 29% la voiture
- 27% le vélo
- 25% le transport public
- 12% la cyclomoteur, le scooter, le moto (voir illustration C)

Il est un plaisir que pratiquement aucune mobilité supplémentaire n'est causée - l'idée de base du FLYER comme moyen de circulation utile dans la vie quotidienne est non seulement soutenue par les développeurs mais aussi par les conducteurs du FLYER. Il est à mentionner que ses données ne sont pas représentatives pour la population totale. Les conducteurs du FLYER d'aujourd'hui présentent un rapport au dessus de la moyenne pour des questions de la mobilité, de l'énergie et de l'environnement.

Par les 53 FLYER qui sont au temps du sondage mise en service on peut attendre des effets sur l'environnement et des potentiels d'économie de l'énergie suivants (sélection des résultats):

- le total de l'économie des sources d'énergie renouvelable et non-renouvelable des 53 FLYER s'élève à environ 2'300'000 MJ ( à une durée d'existence totale de 40'000km par FLYER - ça veut dire à cette période il vaut réparer des pièces endommagées).  
Cela correspond par exemple
  - à une production annuelle au moyen d'une usine de force solaire avec une surface de 6000m<sup>2</sup> des piles solaires( à peine aussi grand comme deux tiers d'un terrain de football)
  - ou à une consommation d'énergie annuelle de 250 ménages suisses (sauf des chauffe-eau électriques).
- on épargne 1,088 MJ d'énergie par kilomètre de personne; cela correspond à l'énergie dont on a besoin pour se doucher pendant une minute.
- pendant la durée d'existence des 53 FLYER on épargne 44'218 kg de pétrole brut venant de la forure; cela correspond à environ 265 tonneaux de pétrole.
- on économise environ 134 tonnes du débit CO<sub>2</sub>; cela correspond au débit de 25 voitures dans une année (roulantes 17.000 km par année avec une consommation de 9,4 litres par 100 km).

**Dans un scénario pour l'an 2003** regarde l'avenir. Le développement du marché pour les bicyclettes qui fortifie la force musculaire est toujours au début. Il se pose la question quels effets sur l'environnement sont à attendre si ces nouveaux moyens de circulation sont mis au marché comme produit en masse.

Au scénario 2003 on calcule premièrement avec les valeurs de FLYER NiCd et deuxièmement on a tellement ajusté les potentiels de substitution ou bien le partage en pour-cent des véhicules qui sont remplacés par les trajets de FLYER que l'on reçoit une estimation réaliste pour beaucoup de personnes. La répartition suivante des véhicules de substitution est supposée:

- 33 % vélos
- 25 % voitures
- 25 % transport public
- 15 % scooter, motos
- 2 % divers moyens (à pied, une mobilité supplémentaire, etc.)

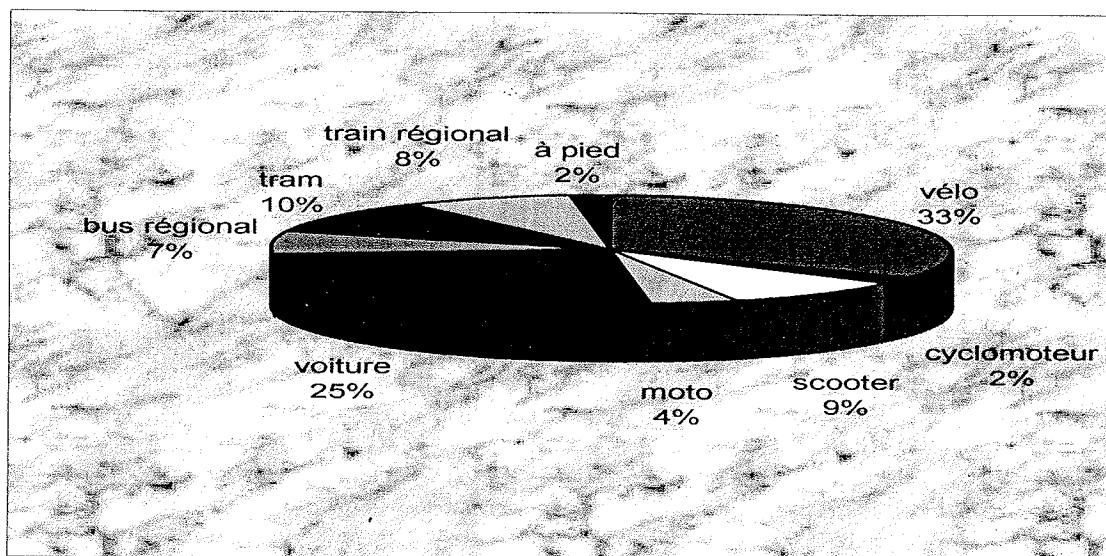


illustration D: la part des véhicules remplacés (scénario 2003)

Comme au calcul des 53 FLYER Pb on prend pour le calcul de ce scénario les mêmes suppositions et conditions pour 10000 FLYER NiCd ou bien pour des bicyclettes en batterie semblable aux FLYER. Des soulagements de l'environnement suivants résultent:

- le total de l'économie des sources d'énergie renouvelable et non-renouvelable des 53 FLYER s'élève à environ 445'559'200 MJ.  
Cela correspond par exemple
  - à une production annuelle au moyen d'une usine de force solaire avec une surface de 1'162'000m<sup>2</sup> des piles solaires (aussi grand comme 120 terrains de football)
  - ou à une consommation d'énergie annuelle de 4'450 ménages suisses (sauf des chauffe-eau électriques).

- pendant la durée d'existence des 10'000 FLYER on épargne 8'048'188 kg de pétrole brut venant de la forure; cela correspond à environ 48'289 tonneaux de pétrole.
- on économise environ 24'320 tonnes du débit CO<sub>2</sub>; cela correspond au débit de 4'615 voitures dans une année (roulantes 17.000 km par année avec une consommation de 9,4 litres par 100 km).

**A côté des soulagements de l'environnement réels** par la mise en service des bicyclettes qui fortifient la force musculaire il y a encore un effet très important: le moyen de circulation excite aussi des procès de penser à l'avenir. Le comportement de la mobilité jusqu'à présente est sondé et une nouvelle compréhension de la mobilité et de l'énergie se produit.

## Short version

**Innovative and environmentally oriented mobility programmes** are in demand. Muscular power supporting electrobikes are developing into a new means of transport, providing additional benefit in everyday communication compared to the traditional ones. Developments in this field show that in a few years electrobikes are likely to become natural elements of traffic.

**This study** provides, on the basis of the FLYER electrobike, answers to the question if the use of muscular power supporting bicycles is at all appropriate and worth being promoted from an ecological point of view. Above all, three groups are interested in this information:

- First, there are the environmentally aware **consumers**, faced with the problem of evaluating the great number of new means and forms of transport. Are new means of transport really an ecologically better alternative to the existing ones? Or are damages to the environment just shifted in place and time? Do they even create additional mobility needs? In terms of light electromobiles (LEM) these are just the questions which are repeatedly subject of public discussion.
- Second, it is the **manufacturer** BKTech AG, who as developing, producing and distributing firm with high environmental standards is above all interested in the ecological balance sheet of FLYER. Where is potential for improvement? Which means of transport are replaced by trips by FLYER? Which effects on the consumption of energy can be expected if electrobikes are used in higher numbers of pieces?
- Third, there are the **public authorities and political institutions** who need to know if these vehicles require new measures to be taken. How should the new means of transport be integrated in the political process? How will these innovative vehicles influence future decisions on the promotion of a new mobility?

This study pursues three objectives:

1. To draw up the **eco-balance** of the FLYER electromobile and of the substitute vehicles
2. To estimate the FLYER's shifting and substitution potential
3. To determine the effects on the environment, above all the possible economies on the consumption of energy by the employment of FLYER

By employing the **methodology of eco-balancing** the FLYER's effects on the environment are analysed as objectively and comprehensively as possible. The results of an ecological balance must not be considered as absolute but always be seen against the background of the assumptions and basic conditions made in the process. The results are represented in the reference quantity person-kilometer (i.e. the transport of a person over one kilometer).

## Principal Results of the Study

### 1. Comparison of FLYER Pb and FLYER NiCd

Should the lead-gel-battery equipped FLYER (FLYER Pb) be preferred to the in future possibly with nickel-cadmium-battery equipped FLYER (FLYER NiCd) or not? The results in terms of energy, waste and air emission are as follows:

**Energy:** Due to the elaborate procedure to provide nickel more energy is needed to manufacture a set of nickel-cadmium-batteries (with FLYER, one set of batteries equals two batteries) than a set of lead batteries.

When the total life of the batteries is considered, this ratio is reversed: Due to the longer life of nickel-cadmium batteries (provided the use of an efficient battery management system, not yet on the market) they must be replaced less often and therefor their production consumes less energy per person-kilometer than the production of lead batteries.

**Waste:** The major part of waste comes up as waste heap in the course of ore mining. The waste heap per person-kilometer incurred in the production of lead batteries is almost twice as big as the waste heap and other waste incurred in the production of NiCd-batteries.

**Air emission:** Both FLYER models show practically identical results in the examination of their air emission, except for the sulphur dioxide (SO<sub>2</sub>). Here, the FLYER Pb shows definitely better results as the FLYER NiCd, because the sulphur dioxide emissions of batteries are incurred mostly in the smelting of the nickel.

**Conclusion:** The results have been obtained on the basis of inaccurate data on ore mining and processing. Also, the toxicity for people and the environment could not be considered due to missing data on the emission of lead, nickel and cadmium in the construction and recycling process.

In view of the current state of technology, the available information and the assumptions made in this study, the FLYER Pb makes a more favourable impression than the FLYER NiCd. This will change as soon as an efficient battery management system for NiCd-batteries is on the market which will significantly prolong the life of NiCd batteries.

## 2. Comparison of Flyer with substitute vehicles

The employment of FLYER is particularly interesting when trips by FLYER replace journeys by other vehicles which cause more damage to the environment.

The comparison of different types of vehicles is based, among other things, on assumptions concerning utilization. *The eco-inventory is based on today's average utilization in Switzerland to enable a conversion in person-kilometer.* Table A shows the corresponding figures for the vehicles included in the balance.

Means of transport	Utilization		Capacity
	absolute (persons)	relative	Persons
Motorcar	1,72	34%	5
Regional bus	16,4	41%	40
Tram	28	18%	160
Regional train	32	17%	193

Table A: Utilization and capacity of motorcar, regional bus, tram and regional train

Illustration A shows the consumption of primary energy per person-kilometer of the vehicles considered in this study, divided into renewable and non-renewable energy. Illustration B shows the consumption of energy per person-kilometer, divided into operating energy, provision of operating energy and residual energy (i.e. production, maintenance and disposal of the vehicles).

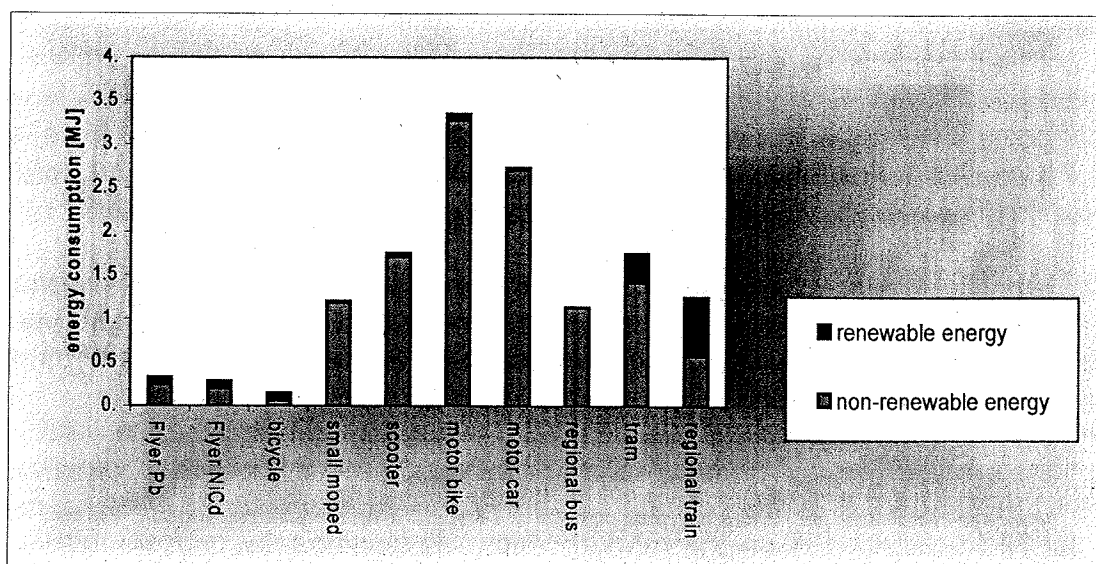
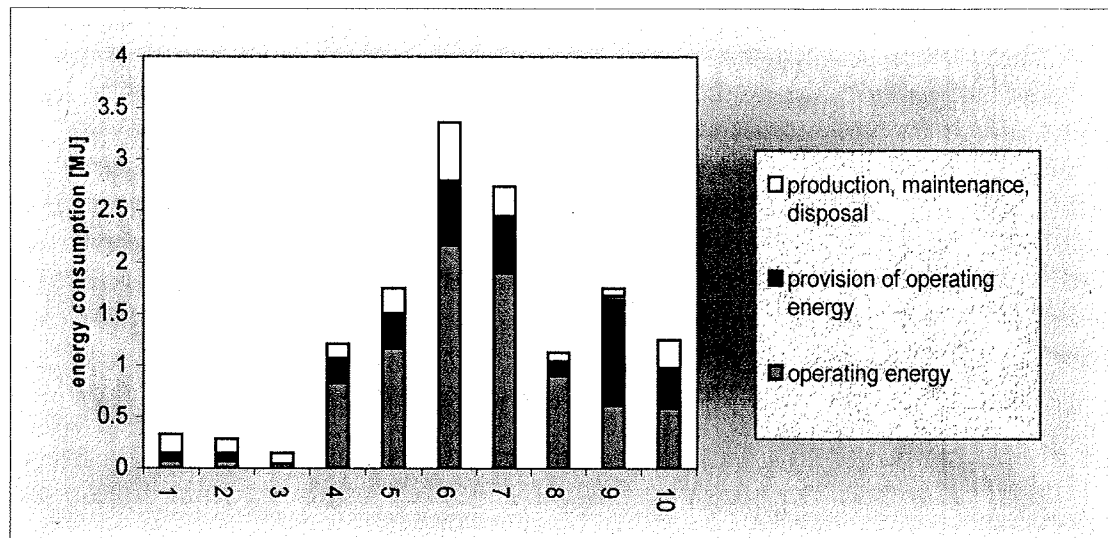


Illustration A: Energy consumption per person-kilometer





*Illustration B: Energy consumption per person-kilometer*

A comparison of FLYER with the substitute vehicles with respect to energy, substances harmful to the air and waste leads to the following results:

**Energy:** The FLYER has by far the lowest total energy consumption per person-kilometer (apart from the bicycle). As it is with all electrically driven vehicles and consequently with FLYER, the share of consumed renewable energy is relatively big (the Swiss energy mix contains a big share of water-power).

With FLYER, a comparatively small share of the total energy is consumed.

**Substances harmful to the air:** Flyer causes (apart from the bicycle) the fewest emissions with regard to all examined harmful substances.

Only radioactive substances caused by FLYER are emitted in a relatively high amount, because of the 50% share of nuclear power in the Swiss energy mix.

**Waste:** The available data allow no meaningful statements regarding waste.

**The three assessment methods** of effect-orientated classification (i.e. effects on greenhouse effect, over-fertilization, acidification, reduction of ozone etc.), of pollution limits and of ecological scarcity allow to draw the following conclusions in the comparison of the FLYER with substitute vehicles:

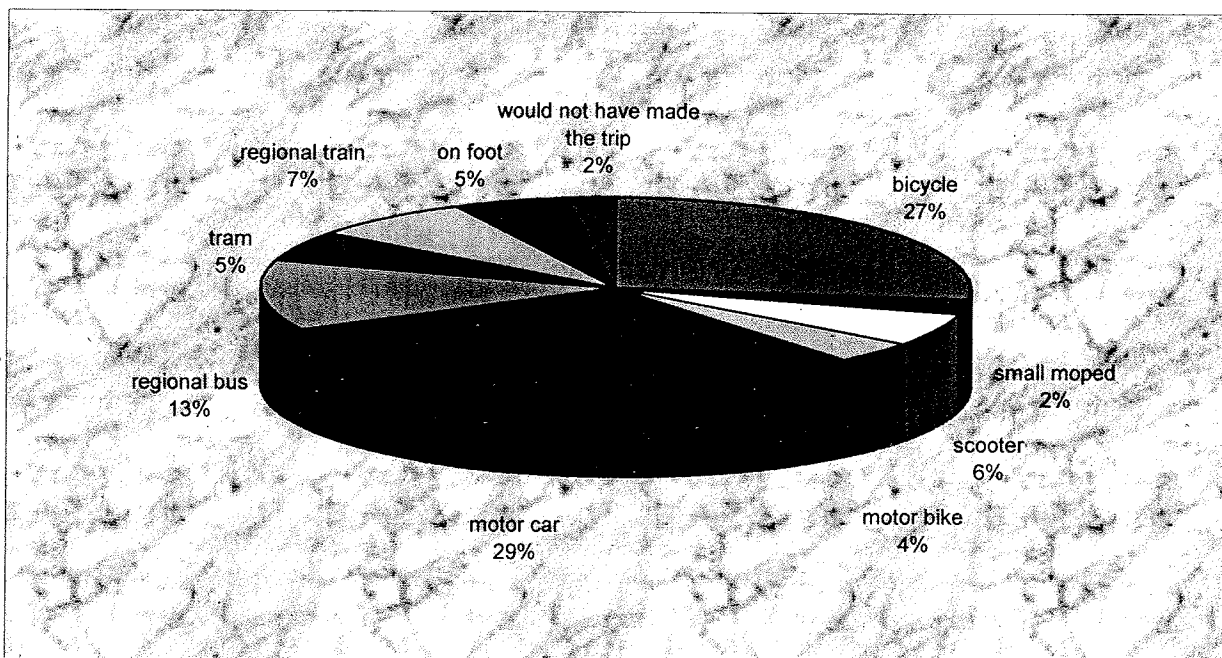
- The environmentally adequate production and disposal of batteries is a decisive factor in the eco-balance of both FLYER models.
- Today's state of accumulators taken into account - which don't guarantee 800-1000 cycles with NiCd-batteries - the FLYER Pb is more advantageous than the FLYER NiCd.

The method of ecological scarcity demonstrates the fact that air pollution leads to most damages to the environment by far. The energy consumption has a share of just over 10% in the damages, damages to the water are one hundred to one thousand times less than damages to the air.

- Compared to the substitute vehicles the FLYER obtains very good results in all points of view. Only the bicycle causes less damages to the environment, as expected. So it can't be the aim to replace mainly bicycle trips by FLYER. But it makes sense and entails a relief for the environment to replace all other vehicles considered in this study by FLYER.
- Individual means of transport such as motor cars, motor bikes, scooters and small mopeds should be replaced primarily. A replacement of means of public transport is secondary. It is satisfactory to notice that the FLYER is employed in this sense already today.

### 3. Substitution potential, ecological effects and energy-saving potential

The wide range of the substitution potential can be regarded as surprising and pioneering for the future. Up to now the assumption was that muscular power supporting two-wheelers would replace primarily trips by bicycle. This assumption is refuted by this study. Illustration C shows the shares of the FLYER trips substituted for other means of transport at the time of the consumer survey (n=53).



*Illustration C: Shares of the substituted means of transport (Survey 1996)*

The 53 persons who participated in the survey used the FLYER to replace

- the car at 29%
- the bicycle at 27%
- public transport at 25%
- small mopeds, scooters, motor bikes at 12% (compare illustration C)

It is satisfactory to find that practically no additional mobility is created - which means the fundamental concept of FLYER as useful daily means of transport is supported not only by its designers but also by the drivers of FLYER. It should be noted that these data are not representative for the total population - today's drivers of FLYER are exceptionally aware of questions regarding mobility, energy and environment.

The **following ecological effects and energy-saving potentials** can be obtained through the use of the 53 FLYERS in operation at the time of the survey (choice of results):

- The total of savings on renewable and non-renewable energy is just over 2,300,000 MJ with 53 FLYERS (based on total life of 40,000 km per FLYER - which means within this period it is worthwhile replacing defective parts).

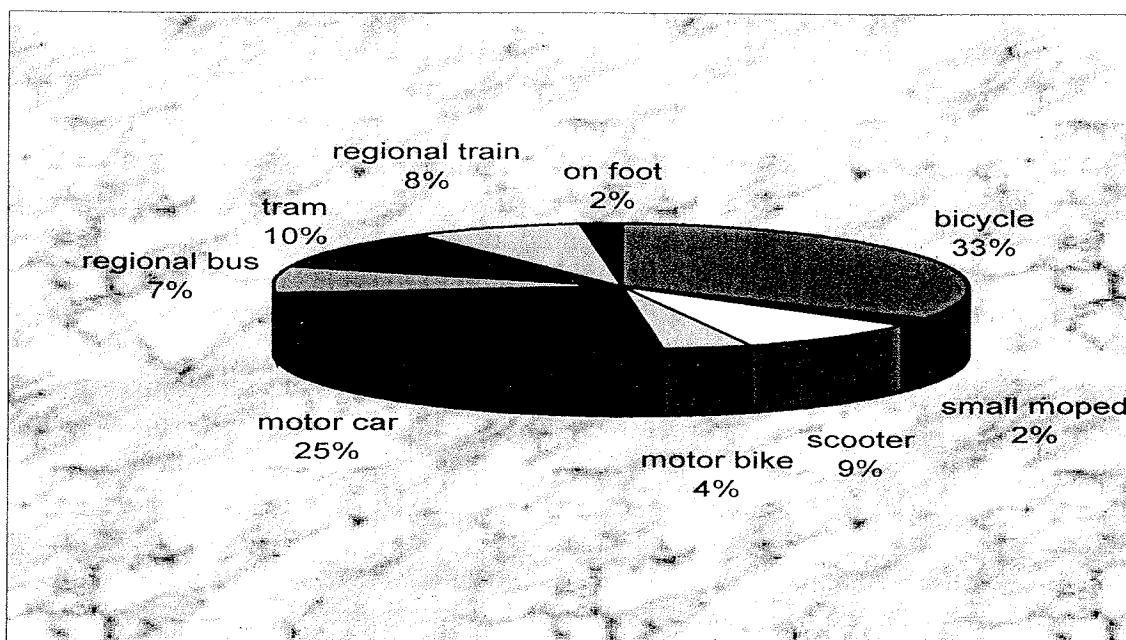
This equals for example:

- the average annual production of a solar energy plant with an solar cell surface of 6,000 m<sup>2</sup> (almost as big as two thirds of a football field) or
  - the annual energy consumption of 250 Swiss households (no electrical water heater)
- 1.088 MJ of energy is saved per person-kilometer, energy which can be used to heat water to take a hot shower for 1 minute.
  - The 44,218 kg of crude oil from drill hole which are economized with the 53 FLYERS during their total life equal the content of about 265 barrels of oil.
  - The cuts in the emission of CO<sub>2</sub> of about 134 tons equal the annual emission of 25 motor cars (based on 17,000 driven kilometers and a consumption of 9.4 litres /100 km)

**In a scenario for the year 2003** a look at the future is taken. Markets for muscular power supporting two-wheelers are only just beginning to develop. The question arises which ecological effects are to be expected, when this new means of transport is employed as mass product.

The scenario 2003 is based on the results of the FLYER NiCd and the substitute potential respectively the percentage distribution of the vehicles replaced by FLYER have been modified (on the basis of further surveys, not depending on this study) so that they can be taken as a realistic estimate for a wide range of population. The following distribution of the substitute vehicles is assumed:

- 33% bicycles
- 25% motor cars
- 25% public transport
- 15% scooters/ motor bikes
- 2% others (on foot, additional mobility, etc.)



*Illustration D: Shares of replaced vehicles (Scenario 2003)*

In the scenario 2003 the calculations for the 53 FLYER were repeated, on the same basis and assumptions, but this time for 10,000 FLYER NiCd and other electrobikes similar to FLYER. The results regarding an ecological relief are as follows:

- The total of savings on renewable and non-renewable energy is 445,559,200 MJ. This equals for example:
  - the average annual production of a solar energy plant with an solar cell surface of about 1,162,000 m<sup>2</sup> (approx. as big as 120 football fields) or
  - the annual energy consumption of 4,450 Swiss households (no electrical water heater)
- The 44,218 kg of crude oil from drill hole which are economized with the 10,000 FLYERS during their total life equal the content of about 48,289 barrels of oil.
- The cuts in the emission of CO<sub>2</sub> of about 24,320 tons equal the annual emission of 4,615 motor cars (based on 17,000 driven kilometers and a consumption of 9.4 litres /100 km).

Apart from the real relief for the environment due to the employment of muscular power supporting two-wheelers there is an additional important effect: this innovative means of transport triggers at the same time further thought process. Previous mobility behaviour is questioned, there is a new understanding of mobility and energy.

# 1. Einleitung

## 1.1 Ausgangslage

**Die Mobilität ist ein „Dauerbrenner“** - Mobilität ist ein beherrschendes Thema der heutigen Gesellschaft. Statistiken belegen die rasante Verkehrsentwicklung, die erfreuliche Effekte mit sich gebracht hat. Neben den erwünschten Folgen dieser Entwicklung haben die unerwünschten Auswirkungen mittlerweile in solch einem Masse zugenommen, dass die Akzeptanzschwelle überschritten ist:

- Die täglichen Staus, steigende Parkbussen, die Abgase und der Lärm sind ein echtes Ärgernis
- Grenzen in der Verkehrspolitik sowie in der Städte- und Raumplanung sind erreicht
- Das Bewusstsein setzt sich durch, dass auch bei Fahrzeugen energieeffiziente Produkte und Prozesse umgesetzt werden müssen
- Verkehrsbedingte Veränderungen in der Umwelt stehen zwar aufgrund der aktuellen Wirtschaftslage nicht mehr zuoberst auf der politischen Traktandenliste, sind aber schlicht nicht länger ignorierbar.

### Fazit:

Mobilität wird zur Zeit neu definiert – innovative und umweltorientierte Mobilitätskonzepte sind gefragt.

**Neben neuen, teilweise bahnbrechenden Technologien** bei drei- und vierrädrigen Fahrzeugen oder neuen Konzepten der Mobilitätsorganisation wie z.B. Fahrgemeinschaften, Autoteilet, Verbund öffentlicher Verkehrsmittel, etc. wird der Langsamverkehr in Innenstädten und Agglomerationen stark gefördert.

**Unter Langsamverkehr** wird in engerem Sinne der Fussgänger- und Fahrradverkehr verstanden. Im weiteren Sinne kann dazu auch die Verstetigung des Verkehrsflusses auf einem tiefen Geschwindigkeitsniveau verstanden werden. Ziel ist, nicht mehr länger den Menschen dem Verkehr anzupassen, sondern den Verkehr dem Menschen – die Zeiten der Planung autogerechter Städte sind vorbei.

Durch das Einführen von Tempo 30-Zonen oder grossflächigen Verkehrsberuhigungsmassnahmen wird die Mobilität wieder besser auf die Wahrnehmungsfähigkeit und Reaktionszeit des Menschen abgestimmt. Neben der Erhöhung der Lebensqualität für alle Verkehrsbeteiligten können auch die Emissionen und der Energieverbrauch wesentlich verringert werden.

**Fahrräder bieten sich seit jeher** als Verkehrsmittel für den Einsatz im Nahbereich an. Sie weisen für viele Umsteiger einen überraschend hohen Nutzwert bei gleichzeitig äusserst tiefen Kosten an: Fahrräder werden nach dem Mountainbike-Boom heute wieder als gesundes und effizientes Stadtverkehrsmittel entdeckt.

**Für viele Berufstätige** bietet das herkömmliche Fahrrad als echte Alternative zum Auto, Roller oder öffentlichen Verkehr jedoch für den täglichen Einsatz nur bedingten Nutzen. Hindernisse sind die körperliche Anstrengung, das Schwitzen oder die unbefriedigenden Transportmöglichkeiten. Zudem eignet sich das heutige Stadtfahrrad nicht als Imageträger: Mit einem Stadtfahrrad kann in der Regel keine Botschaft verbunden werden wie z.B. mit einem Deux-Chevaux oder einem Porsche. Die Fahrradindustrie bringt heute überwiegend Neuheiten im Mountain-Bike-Bereich auf den Markt. Bei der technologischen Entwicklung und der Vermarktung von Alltagsfahrrädern für den Stadtbereich ist ein enormes Nachholbedürfnis festzustellen.

Das herkömmliche Fahrrad ist nicht den heutigen Bedürfnissen von Personen angepasst, die sich im Nahbereich gesund, schnell, mit Spass und geringem Energieverbrauch fortbewegen wollen.

Das Stadtfahrrad wird zu wenig konsequent gefördert und ist entsprechend „unterentwickelt“.

In diese Lücke stösst ein neues Verkehrsmittel: das Elektrobike als leicht motorisiertes Zweirad, das die eigene Muskelkraft verstärkt und damit als eigentliche „power assistance“ funktioniert. Die unterstützende Wirkung des Elektromotors eröffnet neue Dimensionen und vermittelt ein völlig neues Fahrgefühl. Die damit angesprochenen Zielgruppen der "non sweat generation" gelten im Zweiradbereich als Markt mit weltweit äusserst interessanten Wachstumspotentialen.

**BKTech aus Burgdorf** hat mit dem FLYER Elektrobike ein innovatives Verkehrsmittel entwickelt, das bezüglich Leistungsdaten und Qualität einen neuen Standard setzt. Mit dem FLYER wird bei einer Reichweite von 35-50 km locker eine Geschwindigkeit von 30-35 km/h erreicht. Bei der Mehrzahl der mittlerweile auf dem Markt angebotenen Elektrobikes schaltet der Motor bereits bei einer Geschwindigkeit von 20 km/h aus. Diese Fahrzeuge sind vor allem auf ältere oder einkaufende Personen zugeschnitten, die eine reine Anfahr- und Steigungshilfe benötigen.

BKTech verfolgt konsequent eine andere Philosophie und hat den FLYER als echte Alternative für den Alltagsverkehr konzipiert: Der FLYER ist ein leistungsfähiges Verkehrsmittel, das auch bei höheren Geschwindigkeiten die Muskelkraft verstärkt – und damit für PendlerInnen einen echten Zusatznutzen gegenüber anderen Verkehrsmitteln bietet.

**Warum nun** die vorliegende Studie zum Energiesparpotential von muskelkraftverstärkenden Zweirädern? Verschiedene Fragen haben zu dieser Studie geführt:

- Von Seite der **KundInnen**: Die Fülle an neuen Verkehrsmitteln und –formen stellt umweltbewusste Konsumenten vor ein Problem: Stellt ein neues Verkehrsmittel wirklich auch eine ökologisch sinnvollere Alternative zu bestehenden Lösungen dar? Oder werden damit Umweltbelastungen einfach räumlich und zeitlich verlagert? Werden gar zusätzliche Mobilitätsbedürfnisse geschaffen? Gerade bei

Leichtelektromobilen (LEM) sind diese Fragen immer wieder Gegenstand der öffentlichen Diskussion.

- Von Seite des **Herstellers**: Für BKTech als Entwicklungs-, Produktions- und Vertriebsfirma mit hohen Umweltansprüchen sind diese Informationen ebenfalls von Bedeutung: wie sieht die Ökobilanz des FLYERs aus? Wo sind Verbesserungspotentiale vorhanden? Welche Verkehrsmittel werden durch FLYER-Fahrten ersetzt? Welche Energiespareffekte sind zu erwarten, wenn Elektrobikes in grösseren Stückzahlen eingesetzt werden? Ist der FLYER überhaupt ein sinnvolles Produkt?
- Von Seite der **öffentlichen Hand** und **politischen Institutionen**: Wie sind diese neuen Verkehrsmittel in politische Prozesse einzubinden? Wie beeinflussen diese innovativen Fahrzeuge zukünftige Entscheide zur Förderung einer neuen Mobilität?

Die vorliegende Studie bietet Grundlagen zur Beantwortung der gestellten Fragen. Am Beispiel des FLYERs wird in einer umfassenden Ökobilanzierung gezeigt, welche Umweltauswirkungen durch den Einsatz von muskelkraftverstärkenden Zweirädern zu erwarten sind.

## 1.2 Der FLYER

Der FLYER ist ein neues zweirädriges Verkehrsmittel, das sehr fahrradnah und konsequent für den täglichen Nahverkehr konzipiert ist. Sobald in die Pedale getreten wird, verdoppelt ein Elektromotor die eigene Muskelkraft. Das eigene Pedalen wird den FLYER-FahrerInnen nach dem Motto „Flitzen ohne Schwitzen“ erleichtert, aber nicht abgenommen. Bei einer Reichweite von 35 bis 50 km wird locker eine Geschwindigkeit von 30 bis 35 km/h erreicht. Der FLYER spricht aus allen Bevölkerungsschichten Personen an, die im Alltag

- **kostengünstig** (Betriebsenergie kostet 20 Rappen auf 100 Kilometer)
- **effizient** (locker mit 35 km/h, bis 50 km weit; ohne Stau- und Parkprobleme)
- **gesund** (treten, aber nicht schwitzen; verbinden von Arbeitsweg und Fitness) und
- **mit Spass** unterwegs sein wollen.

### Der FLYER – sorgt für mehr Spass und Fitness im Alltagsverkehr!

Die Fahrradrahmen werden von der Firma Villiger AG / Buttisholz geliefert, die Montage der Antriebskomponenten, die Endkontrolle und die Vermarktung erfolgen durch BKTech in Burgdorf. Der FLYER wird über FLYER-Fachhändler sowie im Direktvertrieb verkauft und gewartet.



Es werden drei Modelle angeboten: der Praktische (FLYER 7-Gang), der Vielseitige (FLYER 3x7-Gang) und der Exklusive (FLYER Sondermodell in jeweils limitierter Stückzahl). Für die Berechnungen der Ökobilanzierung wird von einem FLYER 3x7-Gang ausgegangen. Durch den modularen Aufbau unterscheiden sich die drei FLYER-Modelle in einer für die Ökobilanzierungsberechnungen nicht relevanten Weise.

### 1.3 Ziele der Studie

Mit der Studie werden drei Hauptziele verfolgt:

**A) Erstellen der Ökobilanz für den FLYER und die Substitutionsfahrzeuge**

Als Arbeitsgrundlage werden die Ökobilanzen für den FLYER und für die durch den Einsatz des FLYERs substituierten Verkehrsmittel (Fahrrad, Mofa, Roller, Motorrad, Personenwagen, Regionalbus, Tram und Regionalzug) erstellt.

**B) Schätzung des Verlagerungs- bzw. Substitutionspotentials**

Das Verlagerungs- bzw. Substitutionspotential muskelkraftverstärkender Zweiräder wird geschätzt, insbesondere für die Schweiz. Es wird gezeigt, welche Verkehrsmittel durch muskelkraftverstärkende Zweiräder ersetzt werden können.

**C) Berechnung der Umwelteffekte, insbesondere des Energiesparpotentials**

Die Umwelteffekte und dabei insbesondere das Energiesparpotential von muskelkraftverstärkenden Zweirädern werden aufgrund des erhobenen Substitutionspotentials berechnet. Als Grundlagen werden die Ökobilanzen des FLYERs und der Substitutionsfahrzeuge verwendet.

Die Ziele der Studie sind in folgender Übersicht dargestellt:

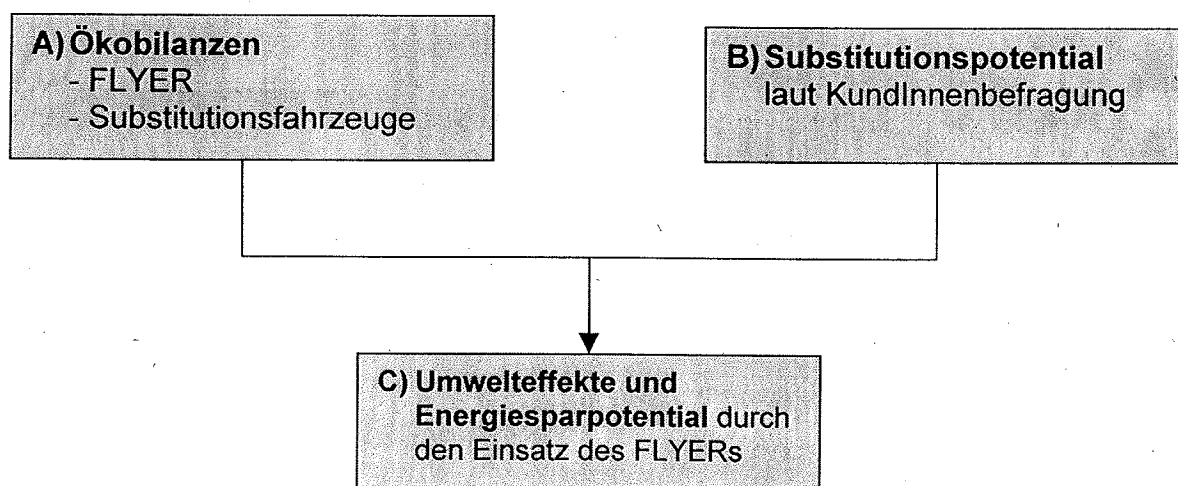


Abbildung 1: Studienziele

## 1.4 Aufbau der Studie

Nach der Einleitung wird in Kapitel 2 die Methodik erläutert. Gerade bei Ökobilanzierungen stellt der methodische Teil der Schlüssel zur Interpretation und zum späteren Vergleich der Ergebnisse mit anderen Studien dar. In Kapitel 3 werden die Quellen und Annahmen beschrieben, die zu den Inputdaten des FLYERs führten. Als Basis für die Berechnung der Energiesparpotentiale werden in Kapitel 4 die Inputdaten der Substitutionsfahrzeuge dargestellt.

Die Auswertung mit Schlussfolgerungen erfolgt in Kapitel 5: Der FLYER wird mit den Substitutionsfahrzeugen verglichen. Kapitel 6 zeigt die Energiesparpotentiale im Ist-Zustand (auf der Basis von 53 FLYERn) und für ein Szenario 2003. Im Anhang finden sich die Tabellen mit den Inputdaten und die Tabellen mit den Resultaten in vollständiger wie auch in zusammengefasster Form.

**Danken** möchten die Autoren insbesondere dem Bundesamt für Energiewirtschaft, dem Wasser- und Energiewirtschaftsamt des Kanton Bern und dem Kantonalen Amt für Industrie, Gewerbe und Arbeit des Kanton Bern, die mit ihrer Unterstützung diese Studie erst ermöglicht haben.

Allen Personen, die mit Kritik und Anregungen zum Gelingen dieser Studie beigetragen haben, sei an dieser Stelle ebenfalls herzlich gedankt! Ein spezieller Dank gehört Laurent Reusser von der EMPA St. Gallen für die methodische Betreuung und das Zur-Verfügung-Stellen des Programms EcoPro, Hans Fuhrer von der Firma Villiger für das detaillierte Zusammenstellen der Inputdaten für das Fahrrad, Jürg Gösen für das Korrigieren und Kritisieren des Berichts sowie Andreas Peter für das Layout und das intensive Überarbeiten der gesamten Studie.

## 2. Methodik

Mit dieser Studie sollen möglichst objektiv und umfassend die Umweltauswirkungen erfasst werden, die durch den FLYER entstehen. Durch die Komplexität der Fragestellung kann dieser Anspruch nie vollständig erfüllt werden. Die Ergebnisse dürfen deshalb nicht als absolut betrachtet werden - sie sind immer vor dem Hintergrund aller getroffenen Annahmen und Rahmenbedingungen zu verstehen.

Die Ergebnisse dieser Studie sind immer vor dem Hintergrund aller getroffenen Annahmen und der Rahmenbedingungen zu verstehen, unter welchen die Ökobilanzierung entstanden ist.

### 2.1 Ökobilanz

In diesem Kapitel wird dargestellt, wie in dieser Studie der Begriff „Ökobilanz“ verstanden wird.

**Der Sinn einer Ökobilanz ist die Berechnung der ökologischen Auswirkungen eines Produktes über seinen gesamten Lebenszyklus, d.h. von der Herstellung bis zur Entsorgung.** Dabei werden auch vorgelagerte Prozesse wie z.B. die Erzeugung der Betriebsenergie berücksichtigt. Die Ökobilanz kann ein Hilfsmittel sein, wenn verschiedene Produkte nach ökologischen Kriterien bewertet werden sollen – sei dies als Produzent, der umweltfreundlichere Produkte und Produktionsprozesse einführen möchte, als Zwischenhändler, der sein Sortiment ökologisch ausrichten will oder als Konsument, der in einer Kaufentscheidungssituation ökologische Kriterien berücksichtigen will.

Die Resultate einer Ökobilanz dürfen jedoch keinesfalls als absolut betrachtet werden. Die Methode der Ökobilanzierung ist relativ neu, und Standardisierungsbemühungen erfolgen erst seit wenigen Jahren (ISO 14040). Oft sind benötigte Daten nicht vorhanden oder nur grob abschätzbar. Deshalb sind Resultate einer Ökobilanz ohne Angaben über das Verfahren sowie die Genauigkeit und Vollständigkeit der Datengrundlage nicht sinnvoll. In diesem Bericht wird versucht, das Vorgehen so genau wie möglich zu beschreiben.

**Die Resultate einer Ökobilanz** werden durch einen weiteren Aspekt relativiert: Viele ökologische Auswirkungen können nicht quantifiziert werden und erscheinen deshalb nicht in der Ökobilanz. Als Beispiel sei hier die Veränderung des Landschaftsbildes genannt. Weiter ist die Wirkungsweise vieler Stoffe nicht bekannt - die Resultate können in gewissen Bereichen gar nicht sinnvoll bewertet werden.

Trotzdem können Ökobilanzen ein sinnvolles Instrument sein bei der Entscheidung zwischen zwei Produkten oder bei der Suche nach Optimierungsmöglichkeiten: Im Gegensatz zur herkömmlichen Betrachtung der direkten, offensichtlichen Umweltauswirkungen liefert eine umfassende Betrachtung mittels einer Ökobilanz oft völlig neue Erkenntnisse.

**Zusammenfassend** kann festgehalten werden, dass Ökobilanzen sinnvoll sind, ihre Resultate aber mit der nötigen Vorsicht und nicht mit blindem Vertrauen verwendet werden dürfen. Weiter ist zu wünschen, dass sich in Zukunft ein Standard der Ökobilanzierung durchsetzt und sowohl mehr als auch genauere Daten zur Verfügung stehen. Dadurch wird die Glaubwürdigkeit und Aussagekraft von Ökobilanzen laufend erhöht.

## Das Vorgehen bei der Ökobilanzierung

Eine Ökobilanzierung besteht aus mehreren Schritten, die nachstehend kurz erläutert werden.

1. **Festlegung des Ziels.** Ist das Ziel primär der Vergleich verschiedener Produkte oder z.B. die Ermittlung von Schwachstellen eines Produktes?
2. **Definition der Systemgrenze.** Was soll alles berücksichtigt werden? Wie weit bzw. in welcher Form sollen z.B. vorgelagerte Prozesse einbezogen werden?
3. **Definition der Bezugsgrösse (funktionelle Einheit).** Sollen die Umweltauswirkungen pro Stück, pro Kilogramm, pro Kilometer, etc. berechnet werden?
4. **Erhebung und Eingabe der Daten.** In diesem Schritt werden die entsprechenden Daten erhoben und auf die gewählte Bezugsgrösse umgerechnet. Wo keine Daten vorhanden sind, werden nach Möglichkeit Schätzungen vorgenommen. Diese sogenannten **Inputdaten** (vgl. Anhang 1) werden in der Regel in ein Computerprogramm eingegeben. Für die vorliegende Studie wurde das Programm EcoPro verwendet, welches an der EMPA St.Gallen entwickelt wurde. Die Funktion dieses Programmes ist, die Inputdaten zu verrechnen, Gleiches zu summieren und vor allem die Inputdaten mit im Programm gespeicherten Daten zu verknüpfen. Beispiel: Für die Herstellung eines Produkts werden zwei Kilogramm Stahl benötigt. Das Programm verknüpft diese Information mit den gespeicherten Werten zu den Umweltauswirkungen, die beim Abbau und der Verhüttung des Eisenerzes entstehen. Das Programm liefert die Outputdaten, eine umfangreiche Liste von verbrauchten Materialien und Energieträgern, Emissionen, anfallenden Abfällen und je nach Programm gar noch detaillierteren Informationen. Diese Resultattabellen, auch als **Inventar** bezeichnet, sind in Anhang 3 zu finden. Es ist wichtig, sich bewusst zu sein, dass diese Inventare nur so exakt und vollständig sein können wie die Inputdaten selbst. Ein Inventar kann als Verknüpfungsgrundlage für die Bilanzierung von Produkten verwendet werden. Beispiel: Das Inventar eines Bleiakkus kann für die Bilanzierung des FLYERs verwendet werden.
5. **Reduktion der Daten, Auswertung.** Die immense Menge von Daten, die ein Inventar beinhaltet, sagt über ein Produkt relativ wenig aus. Die Daten müssen zuerst auf wenige Werte reduziert und somit den BenutzerInnen zugänglich gemacht werden. Mögliche Vorgehensweisen werden in Kapitel 2.7 erläutert.
6. **Interpretation und Bewertung der Daten.** Erst jetzt, nach all diesen Schritten, die viele subjektive Annahmen und Fehlerquellen beinhalten können (wobei Eingabe- und Berechnungsfehler am besten mit detaillierten Plausibilitätsanalysen erkannt werden), kann das bilanzierte Produkt bezüglich seiner ökologischen Auswirkungen bewertet werden (vgl. Kapitel 5).

Als weiterführende Literatur vergleiche zum Beispiel auch Fecker 1992, Frischknecht 1992, Gottlieb Duttweiler Institut 1992, Scholz 1995 oder Van den Berg 1995.

## 2.2 Definitionen und Begriffe

### 2.2.1 Energie

- **Primärenergie:** „Chemische Energie in Erdöl, Erdgas, Kohle, Holz, Kernenergie, Wasser- und Windkraft, Sonnenenergie, Erdwärme etc. Beispiele sind: Rohöl, Rohgas und Rohkohle ab Förderung, Uranerz ab Mine, Fallenergie von Wasser, Holz im Wald.“ (vgl. May 1996)
- **Endenergie:** „Energieträger frei für den Verbraucher (vor der letzten Umwandlung in die gewünschte Energiedienstleistung). Beispiel: Heizöl im Tank, Erdgas ab Leitung, Kohle im Keller, Holz beim Haus, Strom ab Steckdose.“ (vgl. May 1996)
- **Graue Energie:** „Mit grauer Energie wird diejenige Energie bezeichnet, welche im Zusammenhang mit einem Produkt oder einer Dienstleistung aufgewendet werden muss, aber nicht unbedingt unmittelbar bemerkt wird.“ (vgl. May 1996). Beispiel: Bereitstellung von Treibstoff.
- **Erzeugung von Elektrizität:** In dieser Bilanz werden zwei Elektrizitätsmodelle verwendet. Einerseits der **Schweizer Strommix** (mit Berücksichtigung des Stromaustausches mit dem Ausland), welcher zu einem grossen Teil mit Wasserkraft erzeugt wird. Andererseits der **Mix des europäischen Stromverbundes UCPTE**, dessen Anteil an fossil-thermisch erzeugtem Strom gross ist.

	Schweizer Strommix	UCPTE Strommix
Kernkraft	50.0%	40.2%
Wasserkraft	40.3%	16.6%
fossil-thermische Erzeugung	9.7%	43.2%

Tabelle 1: Zusammensetzung der verschiedenen Elektrizitätsmodelle

- **Einheiten:** In dieser Studie wird teilweise mit abstrakten Energiemengen gearbeitet, die meist nur von Fachleuten in einen Praxiszusammenhang gestellt werden können. Mit der folgenden Tabelle wird versucht, die Einheiten Megajoule (MJ) und Kilowattstunde (kWh) mit Beispielen aus dem Alltag zu verknüpfen und damit anschaulicher zu machen. Beispiel: Der Energiegehalt von 1 kWh entspricht der Energie, die zum Bereitstellen des warmen Wassers für drei Minuten Duschen benötigt wird.

	kWh	MJ	Liter Benzin	Minuten duschen	Gramm Schokolade
1 Kilowattstunde	1	3.6	0.12	3	152
1 Megajoule	0.28	1	0.03	0.83	42

Tabelle 2: Energieumrechnungstabelle

## 2.2.2 Entsorgung

Deponieren:

- **Inertstoffdeponie:** Auf der Inertstoffdeponie werden Stoffe gelagert, die sich kaum mehr verändern (z.B. Bauschutt). Deshalb ist die Freisetzung von Schadstoffen in diesen Deponien sehr gering.
- **Reaktordeponie:** Auf der Reaktordeponie werden Haushaltsabfälle gelagert. Da der Anteil an organischem Material oft recht gross ist, entstehen dabei Deponiegase und Sickerwässer, die gesammelt und gereinigt werden müssen. Ab dem Jahr 2000 sollen in der Schweiz keine Ablagerungen auf Reaktordeponien mehr erfolgen.
- **Reststoffdeponie:** Auf der Reststoffdeponie werden Stoffe mit geringer Schadstofffreisetzung gelagert. Das Sickerwasser muss gesammelt und laufend kontrolliert werden.
- **Sondermülldeponie:** Analog zur SAVA werden auf der Sondermülldeponie kritische Stoffe deponiert. Es herrschen strengste Eingangskontrollen. Der Grund muss abgedichtet und das Sickerwasser aufgefangen und gereinigt werden.

Verbrennen:

- **KVA:** In der Kehrlichtverbrennungsanlage werden die Abfälle verbrannt. Sonderabfälle sollten nicht in die KVA gelangen.
- **SAVA:** In der Sonderabfallverbrennungsanlage werden Abfälle verbrannt, die kritische Stoffe enthalten und besondere Behandlung verlangen. Die Abgase müssen gefiltert werden. Die Filterrückstände werden auf Sondermülldeponien entsorgt.

## 2.2.3 Recycling

- **Direkte Wiederverwendung:** Die Produkte werden nach einer Kontrolle und Revision als Occasionen wiederverwendet.
- **Stoffliche Wiederverwertung:** Die Produkte werden nach Materialien getrennt. Nach einer Aufbereitung können sie als Rohstoffe für neue Produkte verwendet werden.
- **Open-Loop-Recycling:** Die Recyclingrohstoffe werden für die Herstellung eines andersartigen Produktes als Ausgangsprodukt verwendet.
- **Closed-Loop-Recycling:** Die Recyclingrohstoffe werden für die Herstellung eines gleichartigen Produktes wie das Ausgangsprodukt verwendet.

## 2.2.4 Diverses

- **EcoPro:** EcoPro ist ein Computerprogramm, das an der EMPA St.Gallen für das Durchführen von Ökobilanzen entwickelt wurde. Sind die Inputdaten bekannt, lassen sich damit in EcoPro Prozesse definieren, die modular zu Systemen zusammengefügt werden können. Es können Inventare (d.h. Daten von bereits früher bilanzierten Produkten) aufgerufen werden, die Verknüpfungen mit anderen Studien erlauben. Aus den Systemen lassen sich die Inventare bzw. Sachbilanzen berechnen. Daraus resultieren Tabellen, wie sie in Anhang 3 zu finden sind. In

EcoPro sind auch die drei in dieser Studie verwendeten Bewertungsmethoden integriert.

- **Humantoxizität:** Giftigkeit für den Menschen
- **Ökotoxizität:** Giftigkeit für die Umwelt
- **Personenkilometer:** Transporteinheit; eine Person einen Kilometer weit transportieren
- **Tonnenkilometer:** Transporteinheit; eine Tonne einen Kilometer weit transportieren.
- **Pre-combustion:** Energie, die zur Bereitstellung eines Energieträgers aufgewendet wird.
- **UBP:** Umweltbelastungspunkte (Einheit der Bewertungsmethode „Ökologische Knappheit“)

## 2.3 Ziel der durchgeführten Ökobilanz

Ziel der durchgeführten Ökobilanz ist die Bereitstellung und Bewertung von Ökobilanzdaten für den FLYER sowie für die Substitutionsfahrzeuge des FLYERs. Es werden also verschiedene Produkte bzw. Verkehrsmittel miteinander verglichen. Diese Daten dienen zusammen mit den Resultaten der KundInnenbefragung als Grundlage für die Berechnung des Sparpotentials in Kapitel 6. Zusätzlich können auch Anhaltspunkte zu ökologischen Schwachstellen des Produkts FLYER gefunden werden.

## 2.4 Systemgrenze

Bei der Bilanzierung des FLYERs wurde das ganze Leben dieses Fahrzeuges betrachtet. Das heisst, dass die Lebensphasen Herstellung, Betrieb, Unterhalt und Entsorgung des Fahrzeuges bilanziert wurden. Für all diese Prozesse werden Rohstoffe und Energie verbraucht und Transporte durchgeführt. Durch eine Verknüpfung mit den Ökoinventaren für Energiesysteme (vgl. Frischknecht 1994) wird erreicht, **dass auch die Bereitstellung der Rohstoffe, die Erzeugung der Energie und die Produktion der Transportmittel in die Bilanz miteinbezogen werden** (vgl. Abschnitt 3.5 Verknüpfung mit Ökoinventaren). Somit ist zum Beispiel berücksichtigt, dass die Energieerzeugung selbst auch Rohstoffe verbraucht. Das Recycling verschiedenster Stoffe wurde ebenfalls in die Bilanz einbezogen (vgl. Abschnitt 2.6 Recycling) sowie die bei den Prozessen anfallenden Luft- und Wasseremissionen und die Abfälle, soweit dazu Daten erhältlich sind.

Nicht bilanziert wurde hingegen die Infrastruktur. Damit sind sowohl die Strassen wie auch die Produktionsstätten, Lagerhallen, etc. gemeint. Dieses Vorgehen deckt sich mit der Praxis der EMPA St. Gallen. Die Begründung liegt darin, dass die meisten Gebäude, in welchen sich z.B. die Werkstätten befinden, im Laufe ihres Bestehens für verschiedene Zwecke benutzt werden. Somit kann kaum abgeschätzt werden, welcher Anteil an Umwelteinflüssen durch die Produktion bestimmter Produkte entsteht. Es ist auch anzunehmen, dass zur Zeit allein für den Betrieb des FLYERs keine neuen Strassen und Parkplätze gebaut werden.



Anders würde die Situation erst bei einer grösseren Verschiebung der Zusammensetzung von Verkehrsmitteln aussehen (zum Beispiel Ersatz Tausender von Autos durch Elektrofahrräder). Dann wäre denkbar, dass vermehrt Radwege gebaut würden. Es könnte zur Umnutzung bzw. zum Rückbau von Parkplätzen kommen. Da dies aber sehr hypothetisch und auch stark von politischen Kriterien abhängig ist, ist ein Einbezug in die Ökobilanz nicht sinnvoll.

Abbildung 2 stellt die gewählte Systemgrenze graphisch dar.

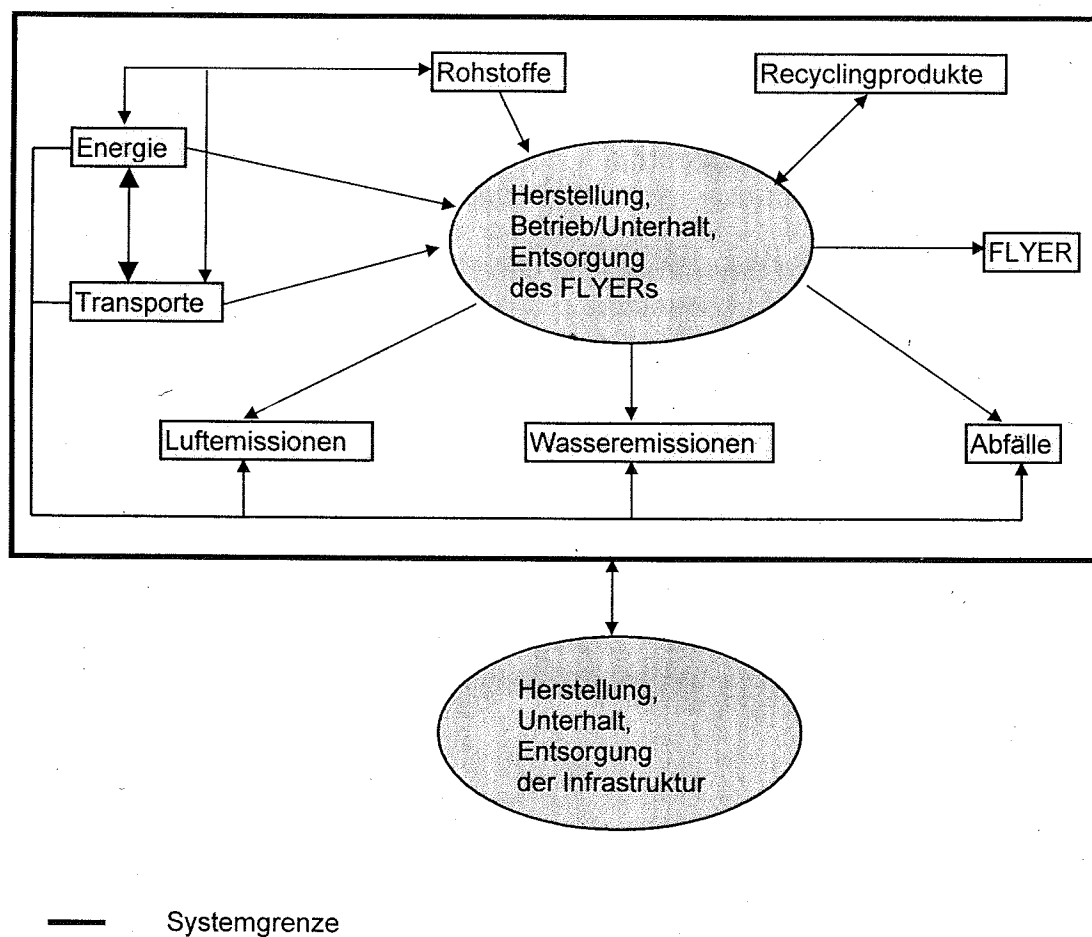


Abbildung 2: Systemgrenze dieser Studie

## 2.5 Bezugsgrösse: Personenkilometer

Als Bezugsgrösse (funktionelle Einheit) wird für die vorliegende Studie die Grösse Personenkilometer gewählt:

Die Ergebnisse dieser Studie beziehen sich auf Personenkilometer, d.h. auf die Beförderung einer Person über einen Kilometer.

In den Resultaten sind auch die entsprechenden Anteile an der Herstellung und Entsorgung des FLYERs enthalten. Um diesen Anteil berechnen zu können, muss geschätzt werden, wie viele Kilometer mit einem FLYER insgesamt gefahren werden können. Die Schätzung der Lebensdauer des FLYERs ist schwierig: Zur Zeit gibt es dazu erst wenige Anhaltspunkte aus der Praxis – der FLYER ist erst seit Anfang 1996 auf dem Markt. Diese Grösse beeinflusst die Resultate jedoch sehr direkt (vgl. Exkurs Kapitel 5.1.2). Auch beim Vergleich des FLYERs mit anderen Fahrzeugen ist diese Grösse notwendige Voraussetzung. Beim Vergleich beispielsweise mit einem Bus kommt als zusätzliche Schwierigkeit die Schätzung der Auslastung dazu. Die Belastung pro Kilometer Busfahrt muss durch die durchschnittliche Anzahl Passagiere geteilt werden, um dieselbe Leistung, nämlich eine Person einen Kilometer zu befördern, vergleichen zu können. Trotz dieser Unsicherheiten ist diese Bezugsgrösse sinnvoll: Nur so werden die Umweltauswirkungen eines Regionalbusses mit denjenigen eines FLYERs vergleichbar.

Für die Inputdaten sind alle Grössen pro FLYER (mit einer angenommenen Gesamtlebensdauer von 40'000 Kilometer, vgl. 3.4.2) und nicht pro Personenkilometer angegeben, da dies anschaulicher ist.

## 2.6 Recycling

In dieser Arbeit werden mehrere Arten von Recycling unterschieden. Die direkteste Art von Recycling stellt die **direkte Wiederverwendung** („Re-using“) dar. Ein Produkt, zum Beispiel ein altes Fahrrad, wird revidiert und als Occasion wieder verwendet.

Bei der **stofflichen Verwertung** dagegen wird ein Produkt in seine verschiedenen Materialien zerlegt. Einige dieser Materialien können nach Verarbeitungsprozessen wieder als Basismaterialien eingesetzt werden. Beim alten Fahrrad werden zum Beispiel die Stahlteile aussortiert, eingeschmolzen und stehen danach für verschiedene Anwendungen neu zur Verfügung.

Werden aus diesem Stahl nun Armierungseisen gegossen, weil die Materialqualität nicht mehr den Anforderungen eines Fahrradrahmens entspricht, liegt ein **Open-Loop-Recycling** vor. Das heisst, der Kreislauf ist nicht eigentlich geschlossen, da

das Material nicht wieder für die Herstellung des ursprünglichen Produktes verwendet werden kann.

Im Gegensatz dazu wird beim **Closed-Loop-Recycling** ein grosser Teil des aussortierten Materials wieder zur Herstellung des rezyklierten Produkts verwendet. Beispiel: Beim Recycling von Bleiakkus wird das Recyclingblei grösstenteils wieder zur Herstellung von neuen Bleiakkus verwendet.

Die verschiedenen Recyclingarten werden bei der Bilanzierung auch entsprechend unterschiedlich berücksichtigt. Bei der direkten Wiederverwendung wie auch beim Closed-Loop-Recycling wird dem Produkt der volle Recyclingprozess angelastet. Dafür werden die gewonnenen Recyclingmaterialien bei den Herstellungsmaterialien abgezogen bzw. als Recyclingmaterialien ausgewiesen – sie werden nicht mitgerechnet. Die durch den Recyclingprozess verursachten Umweltbelastungen sollten auf alle Recyclingmaterialien aufgeteilt werden. Dies ist aufgrund der lückenhaften Datenlage nicht möglich. Das Open-Loop-Recycling wird bilanzneutral behandelt. Dies heisst, dass das Abfallmaterial nicht als Abfall gerechnet wird und auch der Recyclingprozess nicht angelastet wird. Ausgleichend werden aber auch keine Abzüge bei den Herstellungsmaterialien gemacht.

Abbildung 3 und Tabelle 3 stellen die verschiedenen Recyclingmethoden tabellarisch und graphisch dar.

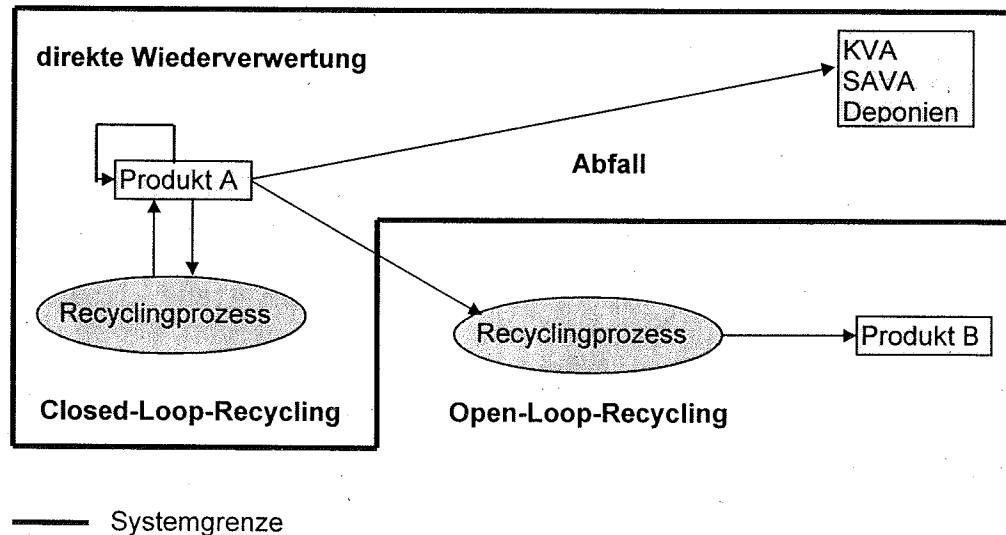


Abbildung 3: Verschiedene Recyclingmethoden

Recyclingmethode		Einbezug in die Bilanz
direkte Wiederverwendung		- Abzug bei Herstellungsmaterial
stoffliche Verwertung	Closed-Loop-Recycling	- Abzug bei Herstellungsmaterial - Anlastung des Recyclingprozesses
	Open-Loop-Recycling	- neutrale Behandlung, d.h. kein Abzug bei Herstellungsmaterial und keine Anlastung des Recyclingprozesses

Tabelle 3: Verschiedene Recyclingmethoden und Einbezug in die Bilanzierung

## 2.7 Methoden zur Auswertung

Um ein möglichst ganzheitliches Bild der Umweltauswirkungen der verschiedenen Fahrzeuge zu erhalten, werden zur Auswertung der Resultate zwei unterschiedliche Ansätze verwendet:

Einerseits werden aus der Fülle von Outputdaten durch die EcoPro-Berechnungen einige Schlüsselgrößen wie Energieverbrauch, CO<sub>2</sub>-Emission oder Abfall herausgezogen und die entsprechenden Werte der einzelnen Fahrzeuge miteinander verglichen. Als Datengrundlage dient die zusammengefasste Resultattabelle in Anhang 2.

Dieses Vorgehen hat den Vorteil, dass die LeserInnen selbst entscheiden können, ob ihnen wichtiger ist, dass das Fahrzeug weniger Energie verbraucht oder weniger Abfall verursacht. Die Gewichtung und Bewertung der einzelnen Umweltauswirkungen werden also den LeserInnen überlassen. Der Nachteil dieses Ansatzes ist, dass all die anderen Größen wie zum Beispiel die Ammoniakemissionen unbeachtet bleiben.

Bei der Auswahl der Schlüsselgrößen werden vorwiegend diejenigen Größen verwendet, die auch in anderen Arbeiten aufgeführt werden. Diese decken sich in den meisten Fällen mit den wertmässig wichtigsten Größen.

Der zweite Ansatz hat zum Ziel, möglichst alle Größen der vollständigen, unbearbeiteten Outputtabelle in Anhang 3 in die Betrachtungen einzubeziehen. Dies wird dadurch erreicht, dass alle Umwelteinflüsse eines Fahrzeuges zu wenigen Werten zusammengefasst werden. Eine Zusammenfassung ist nur möglich, wenn die verschiedenen Umwelteinflüsse gewertet und in Relation zueinander gesetzt werden. Es müssen also Hinweise gefunden werden, die Aussagen erlauben zu Fragen wie etwa „wieviel mal schlimmer ist die Emission eines Kilos Schwefeldioxid als diejenige eines Kilos Kohlendioxid?“ Mögliche Quellen sind Aussagen von Wissenschaftlern, die jedoch sehr stark variieren können, politisch festgelegte Grenzwerte, die zum Teil stark von wirtschaftlichen Interessen beeinflusst sind oder geogene Zustände - das heisst Zustände, die ohne menschlichen Einfluss herrschen würden.

Aus einer Fülle von verschiedenen Methoden zu dieser Fragestellung werden hier drei angewandt, die im Folgenden kurz beschrieben werden (vgl. dazu auch Walder 1991, Van den Berg 1995, BUWAL 1990 oder BUWAL 1991).

### 2.7.1 Wirkungsorientierte Klassifizierung

Eine heute häufig verwendete Methode ist die wirkungsorientierte Klassifizierung, die im „Centre of Environmental Science“ der Leiden University in den Niederlanden entwickelt wurde. Bei dieser Methode werden unterschiedliche Kategorien von Umweltauswirkungen betrachtet, z.B. das Treibhauspotential oder die Humantoxizität. Für jede dieser Kategorien wird ein Referenzstoff gewählt, der per Definition die Schädlichkeit "1 pro Tonne" besitzt. So wurde für das Treibhauspotential Kohlendioxid und für die Humantoxizität Metalle im Wasser gewählt. Alle anderen Stoffe, die in derselben Kategorie Auswirkungen auf die Umwelt haben, werden gemäss ihrer Schädlichkeit in Relation zur entsprechenden Referenzgrösse gesetzt.

Ein Beispiel zur Erläuterung: Methan trägt elf mal stärker zum Treibhauseffekt bei als die Referenzgrösse Kohlendioxid. Methan besitzt also im Bezug auf den Treibhauseffekt ein Wirkungspotential von elf pro Tonne. Für alle Stoffe einer Kategorie von Umweltauswirkungen werden nun die Massen dieser Stoffe mit den entsprechenden Wirkungspotentialen multipliziert und die Produkte aufsummiert. Diese Ausgangslage führt zu folgender Formel:

$$S_i = \sum_k (m_{ki} \times WP_{ki})$$

$S_i$  = Schädlichkeit des bilanzierten Produktes in der Wirkungskategorie i

$m_{ki}$  = Masse des Stoffes k, der Umweltauswirkungen in der Wirkungskategorie i hat

$WP_{ki}$  = Wirkungspotential des Stoffes k für die Wirkungskategorie i

i = Wirkungskategorie, zum Beispiel Treibhauspotential

Damit erhält man einen Wert pro Wirkungskategorie und bilanziertem Produkt. Die Auflistung der Werte aller Wirkungskategorien ergibt das Ökoprofil eines Produktes. Werden nun mehrere Produkte miteinander verglichen, bleibt es immer noch den LeserInnen überlassen, wie die einzelnen Wirkungskategorien gegeneinander gewichtet werden sollen.

Die Schwierigkeit dieser Methode liegt in der Festlegung der Wirkungspotentiale. Wie soll genau definiert werden, wie viel z.B. Methan mehr zum Treibhauseffekt beiträgt als Kohlendioxid? Folge ist, dass in den verschiedenen Studien auch unterschiedliche Sätze von Wirkungspotentialen verwendet werden. Dies bringt zum Ausdruck, wie wenig über die Wirkung der verschiedenen Stoffe bekannt ist, und wie unsicher demzufolge solche Bewertungen sind. Die in dieser Studie verwendeten Werte basieren auf Heijungs 1992.

## 2.7.2 Immissionsgrenzwertmethode

Auch die Immissionsgrenzwertmethode, die in BUWAL 1991 ursprünglich für die Bilanzierung von Packstoffen entwickelt wurde, arbeitet mit Kategorien von Umweltauswirkungen. Als Kategorien werden die Kompartimente Luft und Wasser sowie der totale Energieverbrauch verwendet. Als Bewertungsgrundlage dienen die gesetzlichen Emissionsgrenzwerte. Wie schon weiter oben erwähnt, sind diese Grenzwerte oft von wirtschaftlichen und politischen Interessen geprägt und entsprechen deshalb nicht immer den wissenschaftlichen Erkenntnissen. Zudem liegen längst nicht für alle wichtigen Stoffe - wie z.B. Kohlendioxid - Grenzwerte vor.

Zum Vorgehen: Für jeden Stoff, der beispielsweise ins Wasser gelangt, wird berechnet, wie viele Liter Wasser dadurch bis an den Grenzwert belastet werden. Analog wird für die Stoffe vorgegangen, die in die Luft gelangen. Für die beiden Kompartimente Luft und Wasser werden nun die belasteten Volumina aufsummiert. Es wird davon ausgegangen, dass jeder Liter Wasser bzw. jeder Liter Luft nur von einem Stoff belastet wird.

$$V_i = \sum_k (m_{ki} / g_{ki})$$

$V_i$  = Bis zum Grenzwert belastetes Volumen des Kompartiments i (kritisches Volumen)

$m_{ki}$  = Masse des Stoffes k, die in Kompartiment i gelangt

$g_{ki}$  = Grenzwert des Stoffes k bezüglich des Kompartiments i

i = Kompartiment (Wasser, Luft)

Zu den zwei Werten - Volumen belastete Luft und Volumen belastetes Wasser - werden als weitere Werte oft noch der totale Energieverbrauch und das Deponievolumen berücksichtigt.

Auch bei dieser Bewertungsmethode bleibt es dem Urteil der LeserInnen überlassen, ob für sie sauberes Wasser wichtiger ist als saubere Luft.

## 2.7.3 Methode der Ökologischen Knappheit

Bei der Methode der Ökologischen Knappheit ist es möglich, alle Umweltauswirkungen eines Produktes auf einen Wert zu reduzieren: die Anzahl Umweltbelastungspunkte (UBP) (vgl. BUWAL 1990). Für alle Umweltauswirkungen werden Ökofaktoren gebildet. Wird die Menge der Emission eines bestimmten Stoffes mit dessen Ökofaktor multipliziert, erhält man die Anzahl Umweltbelastungspunkte dieser Emission. Analog können die Umweltbelastungspunkte aller Emissionen, welche durch ein Produkt entstehen, berechnet und am Ende aufsummiert werden.

$$\begin{aligned} \text{UBP} &= \sum_k \{m_k \times \text{Ökofaktor}\} \\ &= \sum_k \{m_k \times (1/b_{\max k}) \times (b_{\text{aktuell } k} / b_{\max k})\} \end{aligned}$$

- UBP = Umweltbelastungspunkte eines Produktes  
 $m_k$  = Emittierte Menge des Stoffes k  
 $b_{\max k}$  = Maximale von der Natur verkraftbare Belastung durch den Stoff k in einem Gebiet  
 $b_{\text{aktuell } k}$  = Aktuelle Belastung eines Gebietes durch den Stoff k  
 $1/b_{\max k}$  = Mass für die Schädlichkeit des Stoffes k  
 $b_{\text{aktuell } k} / b_{\max k}$  = Ausschöpfungsgrad der natürlichen Aufnahmekapazität  
 $(1/b_{\max k}) \times (b_{\text{aktuell } k} / b_{\max k})$  = Ökofaktor

Als Resultat erhält man pro bilanziertes Produkt einen einzigen Wert. Den LeserInnen wird also jegliche Bewertung abgenommen.

Für die Bildung der Ökofaktoren werden vor allem zwei Grössen verwendet: erstens die maximale von der Natur verkraftbare Belastung durch einen bestimmten Stoff ( $b_{\max}$ ) und zweitens die aktuelle Belastung eines Gebietes durch diesen Stoff ( $b_{\text{aktuell}}$ ). Der reziproke Wert von  $b_{\max}$  ist ein Mass für die Schädlichkeit dieses Stoffes. Dieser wird mit dem Quotienten von  $b_{\text{aktuell}}$  und  $b_{\max}$  multipliziert, der ein Mass dafür ist, wie stark die natürliche Aufnahmekapazität bezüglich dieses Stoffes schon erschöpft ist. Schwierig ist bei dieser Methode die Abschätzung von  $b_{\max}$  und die Ermittlung von  $b_{\text{aktuell}}$ .

## 2.8 Methode der KundInnenbefragung

Die KundInnenbefragung wurde bei allen FLYER-FahrerInnen durchgeführt, die den FLYER zum Zeitpunkt der Befragung (August 1996) mindestens zwei Monate oder länger gefahren sind. Ein äusserst ausführlicher Fragebogen und ein Fahrtenbuch, das zur detaillierten Protokollierung aller während 5 ausgewählten Tagen gefahrenen Strecken diente, wurden an insgesamt 78 Personen verschickt. 53 Fragebogen und Fahrtenbücher konnten ausgewertet werden, was einer erfreulichen Rücklaufquote von 68% entspricht.

Die offenen Fragen wurden qualitativ ausgewertet und teilweise kategorisiert, damit sie wie die geschlossenen Fragen mit dem Statistikprogramm „Statistica“ ausgewertet werden konnten. Die Ergebnisse dieser Umfrage befinden sich in Kapitel 6.



### 3. Inputdaten FLYER

#### 3.1 Einleitende Bemerkungen

In diesem Kapitel werden das Vorgehen und die Quellen beschrieben, die zu den im Anhang 1 aufgeführten Inputdaten führten. Diese Daten dienen als Eingabedaten für das Computerprogramm EcoPro, welches eine Verknüpfung mit schon vorhandenen Inventardaten vornimmt (vgl. Kapitel 3.6 Verknüpfung mit Ökoinventaren). Als Resultat ergibt sich das Ökoinventar FLYER. **Die Bezugsgrösse ist jeweils ein FLYER.**

Gemäss der definierten Systemgrenze (vgl. Abschnitt 2.4) werden Daten zu folgenden Bereichen gesammelt:

- **Materialien** (für die Fertigung verwendete Stoffe, inklusive Recyclingmaterialien)
- **Energieverbrauch** (sowohl die Prozessenergie zur Herstellung der Teile, als auch die Energie zum Betrieb des FLYERs, jedoch ohne die Energie zur Herstellung der Materialien, welche durch die Verknüpfung mit anderen Inventaren berücksichtigt wird)
- **Emissionen Luft** (ohne Emissionen der Materialherstellung)
- **Emissionen Wasser** (ohne Emissionen der Materialherstellung)
- **Transporte**
- **Abfälle** (Stoffe, die verbrannt oder deponiert werden)
- **Recycling** (Stoffe, die wieder verwendet werden)

**Es werden die drei Lebensphasen Herstellung, Betrieb/Unterhalt und Entsorgung** untersucht. Diese drei Phasen werden jeweils in sinnvolle Module (z.B. Motor, Elektronik, etc.) unterteilt. Analog zu Maibach 1995 wird die Datenqualität folgendermassen bewertet:

- g = gut: Abweichungen +/- 10%
- m = mittel: Abweichungen +/- 30%
- s = schlecht: Abweichungen +/- 50%.

Die zur Erstellung der Studie verfügbaren Mittel erlaubten keine detaillierte Datenrecherche in allen Bereichen. Prioritäten mussten gesetzt werden: So wird für die **Herstellung** das Schwergewicht auf die Bereiche Material und Energieverbrauch gelegt. Die Prozessenergien können nur grob geschätzt werden, da sehr viele Prozesse involviert sind, die nicht alle detailliert bilanziert werden können. Unter Prozessenergie wird zum Beispiel das Walzen eines Bleches aus Stahlbarren verstanden. Aus Kasser 1995 und Boustead 1979 können folgende Werte entnommen werden:

- Verarbeitung von Aluminium: 6,3-21 MJ/kg
- Verarbeitung von Stahl: 10-44 MJ/kg
- Akkumulatorherstellung: 12 MJ/kg

- Verarbeitung von Kunststoffen: Die Variation der Angaben ist grösser als die Differenz Kunststoff unverarbeitet zu Kunststoff verarbeitet.

Die neueren Publikationen kommen alle zu tieferen Werten, die daher eher der aktuellen Situation entsprechen dürften. Für die Bilanzierung werden analog zu Maibach 1995, wo die Herstellung von Personenwagen bilanziert wurde, ein Energieverbrauch von 12 MJ/kg Produkt eingesetzt, was im Vergleich mit obigen Zahlen realistisch erscheint. Die Aufteilung auf die Energieträger wird folgendermassen angenommen:

- 45% Strom Hochspannung
- 41% Erdgas
- 7% Erdöl
- 7% Kohle.

Weiter werden **die Akkumulatoren, das Fahrrad und die Elektronik** detaillierter betrachtet. Die Akkumulatoren und das Fahrrad machen das Hauptgewicht des FLYERs aus und verursachen somit den grössten Teil der Transportaufwendungen. Zudem wird die Herstellung der Akkumulatoren und der Elektronik allgemein als ökologisch problematisch eingestuft. Sowohl für die Elektronik als auch für die Akkumulatoren konnten trotz intensiver Recherche kaum Daten gefunden werden. Dieser Umstand ist bedenklich, da diese Komponenten in der öffentlichen Diskussion einen hohen Stellenwert einnehmen.

Für die **restlichen Komponenten des FLYERs** werden die Bereiche Emissionen Luft und Wasser, Transporte, Abfälle und Recycling aus systematischen Gründen nicht beachtet. So kann davon ausgegangen werden, dass die Emissionen bei der Herstellung dieser Komponenten viel kleiner sind als die Emissionen der Bereitstellung der Materialien und der Prozessenergie, welche über andere Inventare verrechnet werden. Abfälle entstehen kaum und eventuell anfallende Recyclingmaterialien beeinflussen die Ökobilanz wenig, da es sich vorwiegend um Open-Loop-Recycling handelt (vgl. Abschnitt 2.6 Recycling). Die Transporte werden nur für die schwersten Komponenten und diejenigen mit langen Transportwegen betrachtet (d.h. für Fahrrad und Akkumulatoren).

Für den **Betrieb** werden mit dem Energieverbrauch über die Verknüpfung mit anderen Inventaren alle relevanten Bereiche abgedeckt.

Da beim **Unterhalt** des FLYERs nur Teile ersetzt werden, die schon bei der Herstellung und Entsorgung bilanziert werden, stellen die Daten des Unterhalts eine Kombination von Daten aus der Herstellung und der Entsorgung dar.

Bei der **Entsorgung** wird das Schwergewicht auf die Bereiche Abfälle und Recycling gesetzt. Detailliert betrachtet werden wiederum die Akkumulatoren und die Elektronik. Wichtig wären hier Daten zu den Emissionen, die jedoch nur im Fall der Bleiakkumulatoren vereinzelt zur Verfügung stehen.

Der FLYER wird mit zwei verschiedenen Arten von Akkumulatoren bilanziert. Die meisten der auf dem Markt angebotenen Elektrofahrräder sind mit NiCd-Akkumulatoren ausgerüstet. Die zur Zeit erhältlichen Ladeverfahren entsprechen jedoch noch nicht den Anforderungen von BKTech: Sie bieten eine zu geringe Lebensdauer der NiCd-Akkumulatoren. Deshalb werden erstens die von BKTech

heute eingesetzten **Bleiakkumulatoren** und zweitens die eventuell in Zukunft eingesetzten **Nickel-Cadmium-Akkumulatoren** bilanziert.

Auf die Bilanzierung anderer Akkumulatoren wie z.B. Nickel-Metall-Hydrid oder Lithium-Ion, etc. wird verzichtet. Nicht nur, weil hier noch viel weniger Daten zur Verfügung stehen, sondern weil diese Systeme im Leistungsbereich der Elektrofahrräder noch nicht marktreif sind und auch die Entsorgung nicht gesichert ist. Es ist deshalb nicht anzunehmen, dass solche Akkumulatoren in naher Zukunft bei diesen Fahrzeugen zur Anwendung kommen.

Bevor auf die verschiedenen Daten der einzelnen Lebensphasen "Herstellung, Betrieb/Unterhalt und Entsorgung" eingegangen wird, ist in der folgenden Tabelle als Übersicht die Datenqualität der bilanzierten Bereiche dargestellt.

Herstellung									
	Batterie Pb	Batterie NiCd	Fahrrad	Motor	Kiste	Tretlager	Übertragung	Elektronik	Übrige Teile
Material	m-g	m-g	g	m-g	m-g	g	g	g	m
Energieverbrauch	s	s	s	s	s	s	s	s	s
Emissionen Luft	s	s							
Emissionen Wasser	s								
Transporte	s	s	m						
Abfälle									
Recycling									

Betrieb/Unterhalt									
	Verschleissteile	Batterie Pb	Batterie NiCd	Stromverbrauch	Energieverbrauch Fahrer	Entsorgung			
						Batterie Pb	Batterie NiCd	Elektronik	Übrige Teile
Material	g	m	m						
Energieverbrauch	s	s	s	m	s	m			
Emissionen Luft		s				s			
Emissionen Wasser		m				m			
Transporte		s	s						
Abfälle	m	s	m			s	m	s	m
Recycling	m	s-m	m			s-g	m	s	m

Tabelle 4: Datenqualität der bilanzierten Bereiche (g = gut, m = mittel, s = schlecht)

## 3.2 Herstellung

Für die Bilanzierung der Herstellung wurde der FLYER in folgende Module zerlegt:

- Fahrrad
- Bleiakkumulatoren (FLYER Pb)
- Nickel-Cadmium-Akkumulatoren (FLYER NiCd)
- Motor
- Rahmenkoffer
- Tretlager
- Getriebe
- Elektronik
- übrige Komponenten.

Diese Module werden separat bilanziert, um einerseits die entstehenden Umweltbelastungen je einzeln belasten zu können und andererseits die Daten übersichtlicher und nachvollziehbar darzustellen.

Für alle Module werden die verwendeten Materialien bilanziert und die Prozessenergie geschätzt. Die Emissionen (ohne Energiebereitstellung) konnten nur für die Blei- und Nickel-Cadmium-Akkumulatoren ermittelt werden. Für das Fahrrad, welches gewichtsmässig den grössten Anteil ausmacht (16 kg von insgesamt 33 kg), wird auch der Transport der Rohstoffe zur Fahrradfabrik wie auch der Transport der Fahrräder nach Burgdorf detailliert bilanziert. Für die Akkumulatoren, die aus Japan stammen und mit 12 kg den zweitgrössten Gewichtsanteil ausmachen, werden zur Schätzung des Transportaufwandes Zahlen aus Maibach 1995 entnommen:

- 27'500 km Hochseefrachter
- 1'000 km Bahn
- 150 km LKW 28t.

### 3.2.1 Fahrrad

Das Modul Fahrrad enthält ein gebrauchsfertig ausgerüstetes Fahrrad, wie es die Firma BKTech vom Zulieferer bezieht. Bezüglich der Herstellung dieses Fahrrads stellte die Firma Villiger folgende Daten zur Verfügung:

- Liste der Fahrradkomponenten, wie sie die Firma Villiger bezieht (mit Angabe zu Material, Gewicht, Herkunft und Rohstoffen dieser Komponenten sowie den Transportmitteln für Rohstoffe und Komponenten).
- Angaben zum Material- und Energieverbrauch beim Rahmenbau und Lackieren.
- Qualitative Beschreibung der bei der Produktion verwendeten Verfahren: Reinigung der Rahmen mit Ultraformula (phosphatfrei, biologisch abbaubar, lösungsmittelfrei, wasserlöslich und giftklassenfrei), Oberflächenfinish durch Sandstrahlen ohne Chemikalien, Filteranlagen für Abluft mit Absaugung an der Quelle, Wärmerückgewinnung zur Heizung der Produktion, Verwendung lösungsmittelfreier H<sub>2</sub>O-Lacke, Taschenfilteranlagen, Lagerung und Auslieferung ohne zusätzliche Verpackungsmaterialien.

Aus der Zeitschrift „Aktiv Radfahren 1994“ kann entnommen werden, dass das zum Löten notwendige Flussmittel stark umweltbelastend und dessen Dämpfe gesundheitsschädigend sind.

Die Prozessenergie für die Herstellung der Fahrradkomponenten wird wie bereits beschrieben geschätzt. Für die Transporte der Fahrradkomponenten werden folgende Distanzen angenommen:

- Japan, Singapur, Taiwan und Korea: 27'500 km Seeweg, 1'150 km Landweg
- USA: 10'000 km Seeweg, 1'150 km Landweg
- Frankreich, Belgien, Schweden, Deutschland: 750 km Landweg
- Schweiz: 200 km Landweg

Der Transport der Fahrradrahmen zu BKTech geschieht per LKW und führt über etwa 90 Kilometer.

### 3.2.2 Blei- und Nickel-Cadmium-Akkumulatoren

Das Modul Akkumulator enthält bei der Herstellung sowohl die Akkumulatoren an sich wie auch Kleinteile zu deren Befestigung.

In der Schweiz wird alles geeignete Recyclingblei wieder zu Akkumulatoren verarbeitet (vgl. Reist 1996). Deshalb wird in dieser Studie angenommen, dass für einen FLYER-Akkusatz (ein FLYER-Akkusatz entspricht zwei Akkumulatoren pro FLYER) von den 8.928 kg benötigten Bleis deren 6.15 kg Recyclingblei sind. Die restlichen 2,778 kg sind nicht geeignet für die Akkumulatorenherstellung. Da für die Situation in Japan, dem Herstellerland der verwendeten Akkumulatoren, keine Daten zur Verfügung stehen, werden die Daten der Schweiz verwendet. Folgende Abbildung zeigt die prozentualen Materialanteile von Bleiakkumulatoren (ohne Kleinteile).

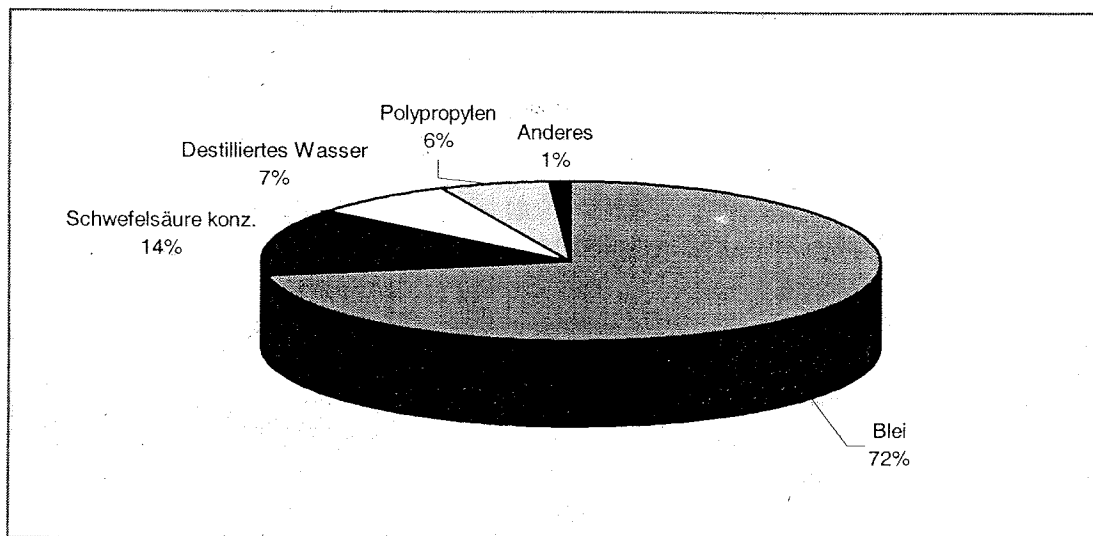


Abbildung 4: Materialanteile von Bleiakkumulatoren

Bei der Herstellung der Bleiakkumulatoren gelangen pro Satz 0.075 g Blei in die Luft und 0.05 g ins Wasser. Als weitere Emission ist Schwefelwasserstoff zu erwähnen. Davon gelangen 30.46 g in die Luft und 6.37 g ins Wasser (vgl. Weibel 1996). Abfälle entstehen kaum - der grösste Teil besteht aus Blei, das problemlos recycelt werden kann (vgl. Bukowiecki 1993).

Für die Herstellung der NiCd-Akkumulatoren konnten nur Angaben zu Luftemissionen gefunden werden. Pro Akku-Satz werden 0.18 g Cadmium, 0.0057 g Kobalt, 42.6 g Staub/Partikel und 0.19 g Nickel emittiert (vgl. Weibel 1996). Abbildung 5 zeigt die prozentualen Anteile der Hauptmaterialien von NiCd-Akkumulatoren.

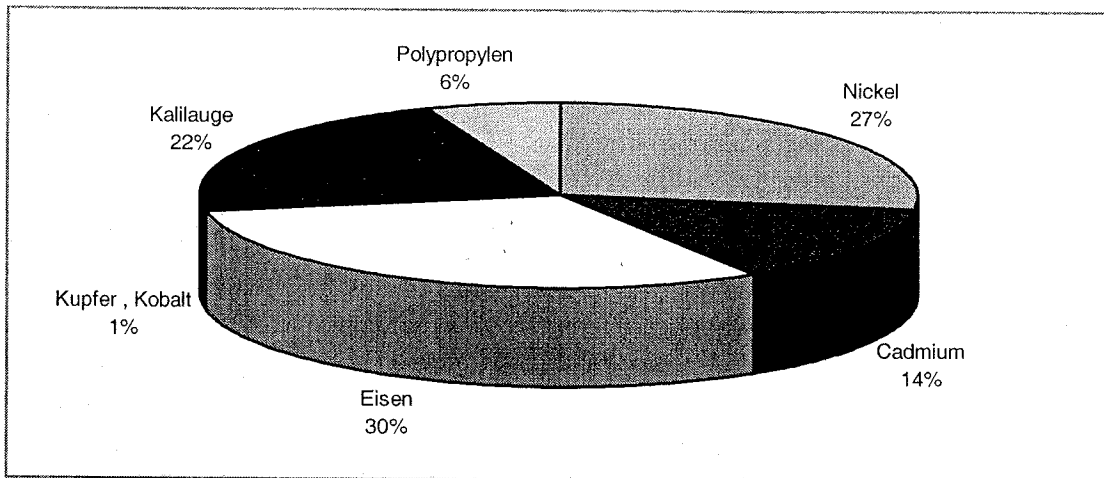


Abbildung 5: Materialanteile von Nickel-Cadmium-Akkumulatoren

### 3.2.3 Motor, Rahmenkoffer, Tretlager, Getriebe, übrige Teile

Sämtliches Material wie Motor, Rahmenkoffer, Tretlager, Getriebe und übrige Teile ist in der BKTech-Werkstatt zusammengetragen und nach Materialien getrennt gewogen worden. Diese Daten sind also sehr genau.

### 3.2.4 Elektronik

Die Komponente Elektronik beinhaltet die Steuerung, das Ladegerät und das Display sowie Platten und Schrauben zur Montage. Die Metallplatten und Schrauben wurden als solche bilanziert. Für die bestückten Leiterplatten konnten keine brauchbaren quantitativen Daten gefunden werden. Sie werden deshalb als Kilogramm Elektronik bilanziert. In der BUWAL-Dokumentation „Anorganische Zusammensetzung von Computereinzelteilen“ (vgl. BUWAL 1992) konnten folgende Angaben zu Leiterplatten gefunden werden: Leiterplatten bestehen zu 71% aus Kunststoffen (Epoxy-Kevlar, Epoxy-Quarz, Teflon und verschiedenen Flammenschutz- und Farbmitteln). Die Bestückung und Beschichtung mit einem Anteil von 29% besteht aus mindestens 16 verschiedenen Elementen, davon ist annähernd die Hälfte Kupfer und ein Viertel Zinn.

Die Herstellung von Elektronikkomponenten ist zum Teil sehr energie- und abfallintensiv. So benötigt zum Beispiel die Herstellung einer Integrierten Schaltung mit 1 cm<sup>2</sup> Chipfläche 9,8 kWh Energie - davon 60% zur Erzeugung der Reinraumatmosphäre(!) - und erzeugt 1,4 kg Abfälle, davon 100 g gefährliche Abfälle (vgl. Soldera 1995).

### 3.3 Betrieb

Für den Betrieb des FLYERs wird der Stromverbrauch ab Steckdose sowie der Energieverbrauch des Fahrers berücksichtigt. Emissionen, welche z.B. aus dem Reifenabrieb entstehen, können vernachlässigt werden: Sie liegen schon beim Personenwagen nur in der Grössenordnung von Mikrogramm pro Personenkilometer (vgl. Maibach 1995).

Wie ein normales Fahrrad erzeugt auch der FLYER praktisch keinen Lärm und keine Erschütterungen. Auch entstehen beim Betrieb des FLYERs keine direkten Emissionen wie zum Beispiel die Abgase bei Mofas. Umweltbelastungen, die bei der Stromerzeugung entstehen, werden über die Verknüpfungen mit den Daten im Programm EcoPro in die Bilanzierung einbezogen.

Da sehr schwer abschätzbar, wurden analog zum Vorgehen der Empa St. Gallen die Infrastrukturen wie zum Beispiel Strassen und Radwege nicht bilanziert (vgl. Abschnitt 2.5).

#### 3.3.1 Stromverbrauch

Messungen der Ingenieurschule Biel ergaben für den FLYER einen Stromverbrauch von 1,13-1,22 kWh auf 100 km (vgl. ISB 1996). Gemessen wurde auf einer 17 km langen Strecke mit 80 Meter Höhendifferenz (Biel-Täuffelen-Biel). Gefahren wurde mit einer ungefähren Pulsfrequenz von 100 Schlägen pro Minute. Die Zahlen stellen die Minimal- und Maximalwerte aus mehreren Fahrten dar. Für die Bilanz wird ein Durchschnitt von 1,175 kWh/100 km verwendet. Es wird angenommen, dass ausschliesslich Niederspannungsstrom aus dem Schweizer Netz verwendet wird. Da die Daten in EcoPro für Mittelspannung gelten (vgl. BUWAL 1996), wird für die Bilanzierung der Niederspannung 12% dazugerechnet – damit sind die Übertragungsverluste berücksichtigt. Die Wahl von Strom Niederspannung Schweiz drängt sich auf, da die Batterien des FLYERs nur mit Niederspannung geladen werden können und bis jetzt die FLYER nur in der Schweiz in Betrieb sind.

Es besteht natürlich auch die Möglichkeit, dass FLYER-FahrerInnen den Betriebsstrom z.B. aus einer eigenen Solar- oder Windkraftanlage beziehen oder Gemeinschaftsanteile an einer solchen Anlage besitzen. Obschon dies bei einigen FLYER-FahrerInnen bereits zutrifft, wird dieser Fall bei der Bilanzierung nicht berücksichtigt. Grund: Bei den heutigen FLYER-KundInnen kann eine überdurchschnittliche Sensibilisierung für Mobilitäts- und Energiefragen angenommen werden. Von diesen Daten darf deshalb nicht direkt auf Motive und Einstellungen der Allgemeinheit geschlossen werden.

Im Szenario Solarstrom (vgl. Kapitel 5.6) wird trotzdem der Frage nachgegangen, wie sich eine Deckung des Betriebsstromes mit Solarenergie auf die Ökobilanz auswirken würde.

### 3.3.2 Energieverbrauch FLYER-FahrerIn

Der FLYER ist ein echtes Hybridfahrzeug: ird zu 50% elektrisch und zu 50% mit eigener Muskelkraft betrieben. Die Motorunterstützung schaltet nur zu, wenn selbst in die Pedale getreten wird. Deshalb wird in dieser Ökobilanz nicht nur der elektrische Antrieb berücksichtigt, sondern auch der durch die körperliche Anstrengung bedingte persönliche Energieverbrauch.

Der zusätzliche Energieverbrauch durch das Fahrradfahren mit einer Geschwindigkeit von 15 km/h (dies entspricht einer Geschwindigkeit von rund 30 km/h beim FLYER) beträgt ungefähr 1200 kJ, was 0,33 kWh pro Stunde bzw. pro 30 Kilometer entspricht. Auf 100 Kilometer werden also rund 1,1 kWh verbraucht (vgl. Interkantonale Lehrmittelzentrale 1987). Die Bereitstellung dieser Energie (Landwirtschaftliche Erzeugung der Nahrung, Zubereitung, Kochen, etc.) wird jedoch nicht berücksichtigt, da sie sehr stark vom Nahrungsmittel wie auch von der Produktionsart abhängig ist und deren Bilanzierung den Rahmen dieser Studie sprengen würde.

## 3.4 Unterhalt

Beim Unterhalt wird die Herstellung und die Entsorgung der Ersatzakkumulatorensätze und der Verschleissteile (z.B. Pneu, Kette, etc.) berücksichtigt. Da die Reparaturen grösstenteils in Handarbeit erfolgen, können Energieverbräuche der Maschinen laut BKTech vernachlässigt werden. Erstellung und Unterhalt (Heizung, Beleuchtung) der Werkstätten werden nicht berücksichtigt (vgl. Kapitel 2.6 Systemgrenzen). Dieses Vorgehen deckt sich mit dem allgemeinen Vorgehen bei Ökobilanzen, die an der EMPA St. Gallen gemacht werden.

### 3.4.1 Akkumulatoren

Der erste, bei der Auslieferung des FLYERs eingebaute Satz Akkumulatoren (Blei oder Nickel-Cadmium) wird unter „Akkumulatoren Herstellung“ und „Akkumulatoren Entsorgung“ verbucht. Im Gegensatz dazu werden die restlichen Akkusätze unter „Unterhalt“ berücksichtigt. Die Akkumulatoren selbst sind jedoch völlig wartungsfrei und benötigen keinen Unterhalt.

Für die Bleiakkumulatoren wird eine Lebensdauer von 8'800 km angenommen. Dies entspricht 250 Vollzyklen zu je 35 km. Diese Zahlen sind dem Technischen Handbuch des Akkumulatorenherstellers entnommen. Ein Vollzyklus heisst, dass erst wieder aufgeladen wird, wenn die Akkumulatoren ganz leer sind.

Die Lebensdauer von Bleiakkumulatoren hängt sehr stark davon ab, wie tief die Akkumulatoren jeweils vor einem erneuten Laden entladen werden. Beispiel: Wer vor dem Aufladen nur 15 km fährt (also die Hälfte der angenommen Reichweite), kann dafür mehr als doppelt so oft laden. Gesamthaft können mit Teilladungen also mehr Kilometer gefahren werden als bei Vollzyklen. Die Lebensdauer hängt zusätzlich von mehreren anderen Faktoren ab: z.B. der Umgebungstemperatur beim Laden, der Art der gefahrenen Strecke (Steigungen) und der Fahrweise der FahrerInnen (Verhältnis Motor- zu Muskelantrieb). Die Lebensdauer kann also durchaus variieren, die 8'800 km stellen jedoch eine realistische Annahme dar. Auf eigene, verlässliche



Erfahrungswerte kann zur Zeit noch nicht zurückgegriffen werden, da die Mehrzahl der FLYER noch nicht weiter als 8'000 km gefahren ist.

Bei einer angenommenen FLYER-Lebensdauer von 40'000 km (vgl. Abschnitt 3.4.2) ergibt sich ein Verbrauch von 4,55 Sätzen pro Fahrzeug. Da der erste Satz unter Herstellung bilanziert wird, werden für den Unterhalt noch 3,55 Sätze berücksichtigt. Angebrauchte Sätze können entweder bei einem anderen FLYER oder für andere Zwecke eingesetzt werden.

Für die Nickel-Cadmium-Akkumulatoren wird eine Lebensdauer von 30'000 km (1'000 Vollzyklen à 30 km) angenommen (Angaben laut Technischem Handbuch). Daraus ergibt sich ein Verbrauch von 1,33 Sätzen pro FLYER, das heisst für den Unterhalt sind noch 0,33 Sätze zu berücksichtigen.

Für die Inputdaten werden die Zahlen aus Akkumulatorenherstellung sowie aus Akkumulatorenentsorgung jeweils mit der entsprechenden Anzahl Batteriesätze multipliziert (vgl. Anhang 1).

### 3.4.2 Verschleisssteile

Für den FLYER wird eine Gesamtlebensdauer von 40'000 km angenommen. Die Lebensdauer wird als die Zeitspanne bezeichnet, in der es sich lohnt, defekte Teile durch neue zu ersetzen. Folgende Komponenten sollten 40'000 km weit nicht ersetzt werden müssen: Motor, Elektronik, Rahmen, Räder, Sattel, Rollenbremsen, Tretlager, Lampen, Rahmenkoffer. Die restlichen Komponenten sind Verschleisssteile. Als Verschleisssteile werden Teile bezeichnet, die während der Lebensdauer eines FLYERs normalerweise ein oder mehrere Male ersetzt werden müssen. Normalerweise heisst durch Normalgebrauch und nicht durch Fehlbenützung oder Unfall bedingt. Berücksichtigt werden Herstellung und Entsorgung von Pneu, Kette, Motorenkette, Kettenspanner, Alukranz, Titankranz und Fahrradglühbirnen. Die Lebensdauer sowie die Inputdaten pro Stück und pro FLYER dieser Teile sind in Tabelle 5 zusammengestellt.

		pro Stück	pro FLYER	Datenqualität	Quelle
<b>Pneu</b>	Lebensdauer	5000 km	7x 2 Stück	mittel	eigene Schätzung
	Gummi	1,12 kg	15,68 kg	mittel	Villiger
<b>Kette</b>	Lebensdauer	10000 km	3 Stück	mittel	eigene Schätzung
	Stahl	0,28 kg	0,84 kg	mittel	eigene Messung
<b>Motorenkette</b>	Lebensdauer	20000 km	1 Stück	mittel	eigene Schätzung
	Stahl	0,11 kg	0,11 kg	mittel	eigene Messung
<b>Kettenspanner</b>	Lebensdauer	20000 km	1 Stück	mittel	eigene Schätzung
	Stahl	0,015 kg	0,015 kg	mittel	eigene Messung
	Stahl galvanisiert	0,01 kg	0,01 kg	mittel	eigene Messung
	Kunststoff	0,005 kg	0,005 kg	mittel	eigene Messung
<b>Alukranz</b>	Lebensdauer	10000 km	3 Stück	mittel	eigene Schätzung
	Alu	0,09 kg	0,27 kg	mittel	eigene Messung
<b>Titankranz</b>	Lebensdauer	20000 km	1 Stück	mittel	eigene Schätzung
	Titan	0,13 kg	0,13kg	mittel	eigene Messung
<b>Fahrradglühbirne</b>	Lebensdauer	20000 km	1x 2 Stück	mittel	eigene Schätzung
	Glas	0,001 kg	0,003 kg	schlecht	eigene Schätzung

Tabelle 5: Lebensdauer der Hauptmaterialien und Verschleisssteile

### 3.5 Entsorgung

Detailliert bilanziert wird die Entsorgung bzw. das Recycling der Akkumulatoren und der Elektronikteile. Für die restlichen Teile wird angenommen, dass die Metallanteile zu 95% recycelt werden (vgl. Bukowiecki 1993, der von einer Recyclingquote Stahl von 100% und Nichteisenmetalle von 85% ausgeht). Die weiteren 5% der Metallanteile gelangen in eine Inertstoffdeponie. Von den restlichen Materialien werden 80% in einer KVA verbrannt, 20% gelangen in eine Inertstoffdeponie (vgl. Greenpeace 1991).

Ein umfassendes Entsorgungssystem für den gesamten FLYER besteht nicht. BKTech klärt zur Zeit Möglichkeiten ab, wie ein solches Recyclingsystem aufgebaut werden kann. Vorstellbar ist auch im Zweiradbereich eine gebührenpflichtige Rücknahme der alten Fahrzeuge, die dann in die verschiedenen Komponenten aufgetrennt und anschliessend optimal entsorgt bzw. wiederverwendet werden können.

#### 3.5.1 Recycling der Akkumulatoren

Bei der Erhebung der Daten zum Batterierecycling stiessen die Autoren auf nicht erwartete Schwierigkeiten. Insbesondere das schwache bzw. teilweise schlicht nicht vorhandene Wissen der Akkulieferanten über das Recycling der von ihnen verkauften und auch zurückgenommenen(!) Produkte ist enttäuschend. Erst auf Druck und über Umwege konnten die Recyclingwege und die daran beteiligten Firmen eruiert werden. Hier sollte in Zukunft unbedingt für mehr Offenheit und Transparenz gesorgt werden.

##### a) Bleiakkumulatoren

Die Daten für die Entsorgung der Bleiakkumulatoren werden einer Studie von G. Eigenmann entnommen (vgl. Ecosens 1995), der die Verarbeitung von Altakkumulatoren untersuchte. Dazu wurden 1993 sechs Firmen in Deutschland, Frankreich, Italien und der Schweiz besichtigt. Einige dieser Anlagen galten als fortschrittlich; die Angaben dürften daher repräsentativ sein für den im Jahre 1993/94 in Westeuropa gültigen Stand der Technik. Da die Emissionen eines solchen Betriebes sehr stark vom Niveau der eingesetzten Technik abhängen, wurden die Daten als Spannen angegeben. Zudem sind Schätzungen für zwei hypothetische Werke verfügbar, die einem unterschiedlichen Stand der Technik entsprechen: Werk A entspricht einer sauberen Technik, jedoch ohne Aufarbeitung des Sulfats zu Natriumsulfat. Werk B entspricht dem besten Stand der Technik, inklusive Aufarbeitung des Sulfats zu Natriumsulfat.

Für die vorliegende Arbeit werden die Daten des Werks B gewählt, da die Firma, welche die Altakkumulatoren des FLYERs entsorgt, das Sulfat aufarbeitet. Die verwendeten Inputdaten sind in Anhang 1 zu finden. Dabei wird angenommen, dass alle Akkumulatoren recycelt werden, was bei der Verkaufslogistik von BKTech gewährleistet ist: Die Akkumulatoren werden über BKTech ausgetauscht (direkt beim Endverbraucher und indirekt beim FLYER-Fachhändler) und gelangen von dort über den Zulieferer in das Recyclingwerk.

### **Verfahrensschritte bei der Verarbeitung von Alt-Bleiakkumulatoren**

In einem ersten Schritt werden die Bleiakkumulatoren in einer Hammermühle zertrümmert. Dabei läuft die Schwefelsäure aus, welche mit 50%-iger Natronlauge zu Natriumsulfat neutralisiert wird. Nach dem Eindampfen können die Natriumsulfatkristalle für die Waschmittel- und die Glasindustrie verwendet werden. Von den Festbestandteilen werden in einem Rüttelsieb Kunststoffe ausgesiebt. Von diesem Gemisch wird mittels eines hydrodynamischen Separators sortenreines Polypropylen abgetrennt. Dieses kann zum Beispiel in der Herstellung von Flaschenharassen oder nichttragenden Autobestandteilen wiederverwendet werden. Den hohen Qualitätsansprüchen in Bezug auf Festigkeit und Lecksicherheit zur Herstellung von Akkumulatorenkästen genügt es jedoch nicht mehr. Die restlichen Kunststoffe können nicht mehr verwendet werden und gelangen deshalb auf eine Deponie. Als weitere Festbestandteile fallen in der Hammermühle pulverförmiges Bleioxid und Bleisulfat (als Paste bezeichnet) wie auch Blei von den Akkumulatorgittern an. Das Blei wird in einem kontinuierlichen Ofen eingeschmolzen, raffiniert und ohne Qualitätsverluste wieder zu Akkumulatorgittern verarbeitet. Die Paste wird in einem Drehofen mittels Petrolkoks oxidiert, und durch selektive Verschlackung werden je nach Kundenwunsch verschiedenste Legierungen hergestellt. Durch Zugabe von Eisenschrot, Soda und Glasbruch wird die anfallende Schlacke auslaugesicher gemacht, damit sie auf einer Inertstoffdeponie gelagert werden kann. Natronlauge, Eisenschrot, Soda und Glas sind in den Daten von Eigenmann/Ecosens 1995 nicht berücksichtigt.

Abbildung 6 auf der nächsten Seite stellt die beschriebenen Verfahrensschritte graphisch dar.

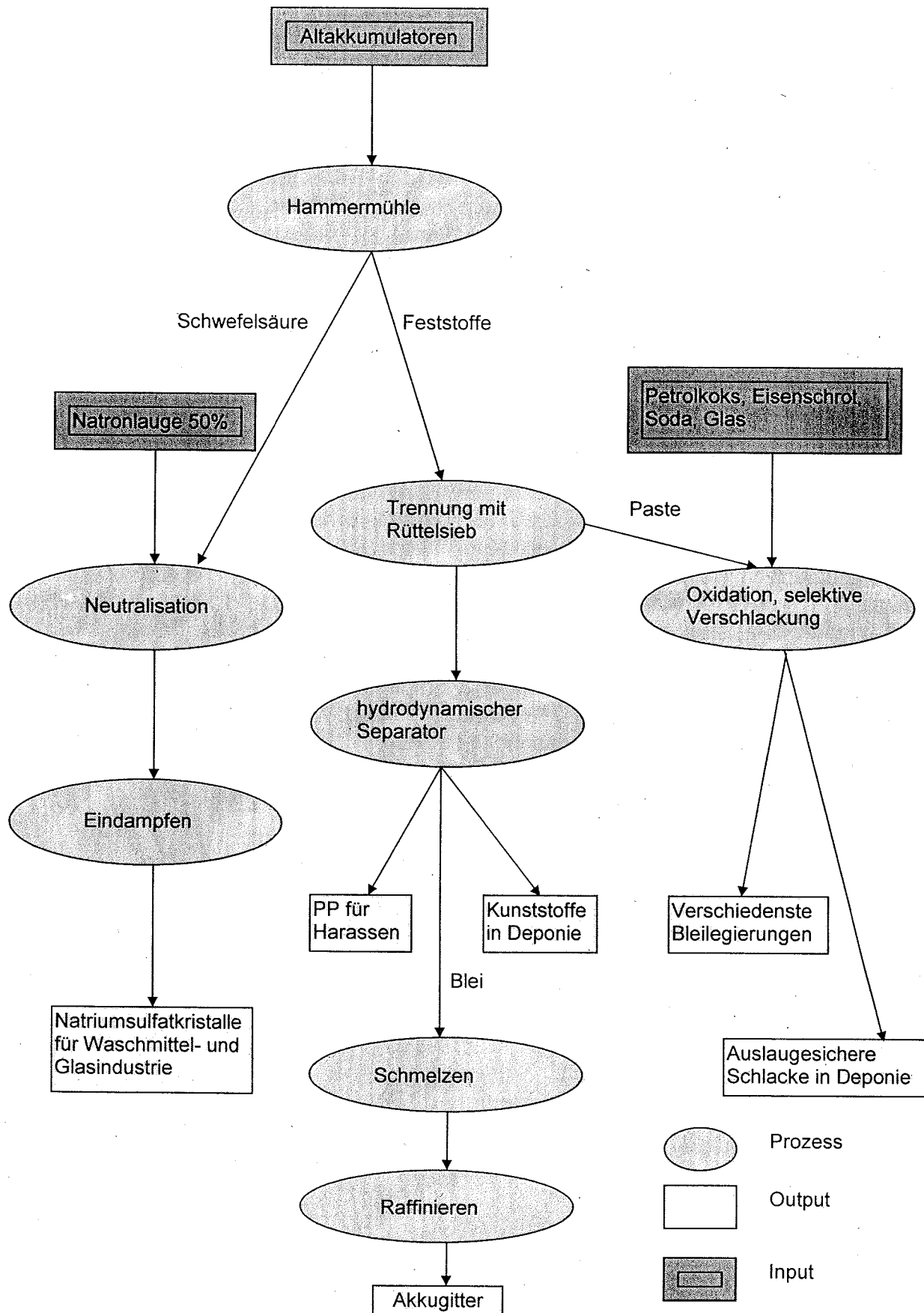


Abbildung 6: Verfahrensschritte der Entsorgung von Bleiakkumulatoren

**b) Nickel-Cadmium-Akkumulatoren**

Aus verschiedenen Quellen konnte entnommen werden, dass NiCd-Akkumulatoren einfach und vollständig rezyklierbar sind und Cadmium ohne Qualitätsverluste wiedergewonnen werden kann (vgl. z.B. „The NiCd Electric Vehicle Information Center“). Die gesamteuropäische Rücklaufquote für Alt-NiCd-Akkumulatoren wird mit 40% bis 80% angegeben. Offenbar sind die Kapazitäten für ein 100%-iges Recycling vorhanden, doch ist dies wegen der tiefen Metallpreise im Moment ökonomisch nicht interessant. Für die beim FLYER in Zukunft eventuell eingesetzten NiCd-Akkus kann analog zu den Bleiakkumulatoren von einem vollständigen Rücklauf ausgegangen werden.

**Verfahrensschritte bei der Verarbeitung von Altakkumulatoren**

In einer Hammermühle werden die Akkumulatoren so behandelt, dass die Kunststoffumhüllung aufbricht, ohne dass die Zellen selbst beschädigt werden. Mit sogenannten „Kunststoffmagneten“ wird der Kunststoff abgetrennt und der thermischen Verwertung zugeführt. Die Akkumulatoren werden als Vorbehandlung pyrolysiert. Die dabei entstehenden Gase durchlaufen einen zweistufigen Filter, bevor sie in die Umwelt gelangen. Der firmenintern festgelegte Grenzwert für Cadmium liegt bei 30 Mikrogramm pro Kubikmeter Luft. Mit Dioxinen gibt es laut der Entsorgungsfirma keine Probleme. Nach der Pyrolyse gelangen die Akkumulatoren zusammen mit Fabrikationsabfällen, Ausschussware und cadmiumhaltigen Filterkuchen und Stäuben in einen Destillationsofen. Dort werden die Metalle mit Hilfe von Holzkohle reduziert – wobei das Cadmium, welches den niedrigsten Schmelzpunkt besitzt, verdampft und im Kühler kondensiert. Nach einer zweiten Destillation kann das neuwertige Cadmium wieder für den Akkulatorbau verwendet werden. Im Destillationsofen verbleibt ein nickelhaltiger Schrott, der von Edelstahlwerken für Legierungen verwendet wird (vgl. NZZ 1995). Abbildung 7 (siehe nächste Seite) stellt die beschriebenen Verfahrensschritte graphisch dar.

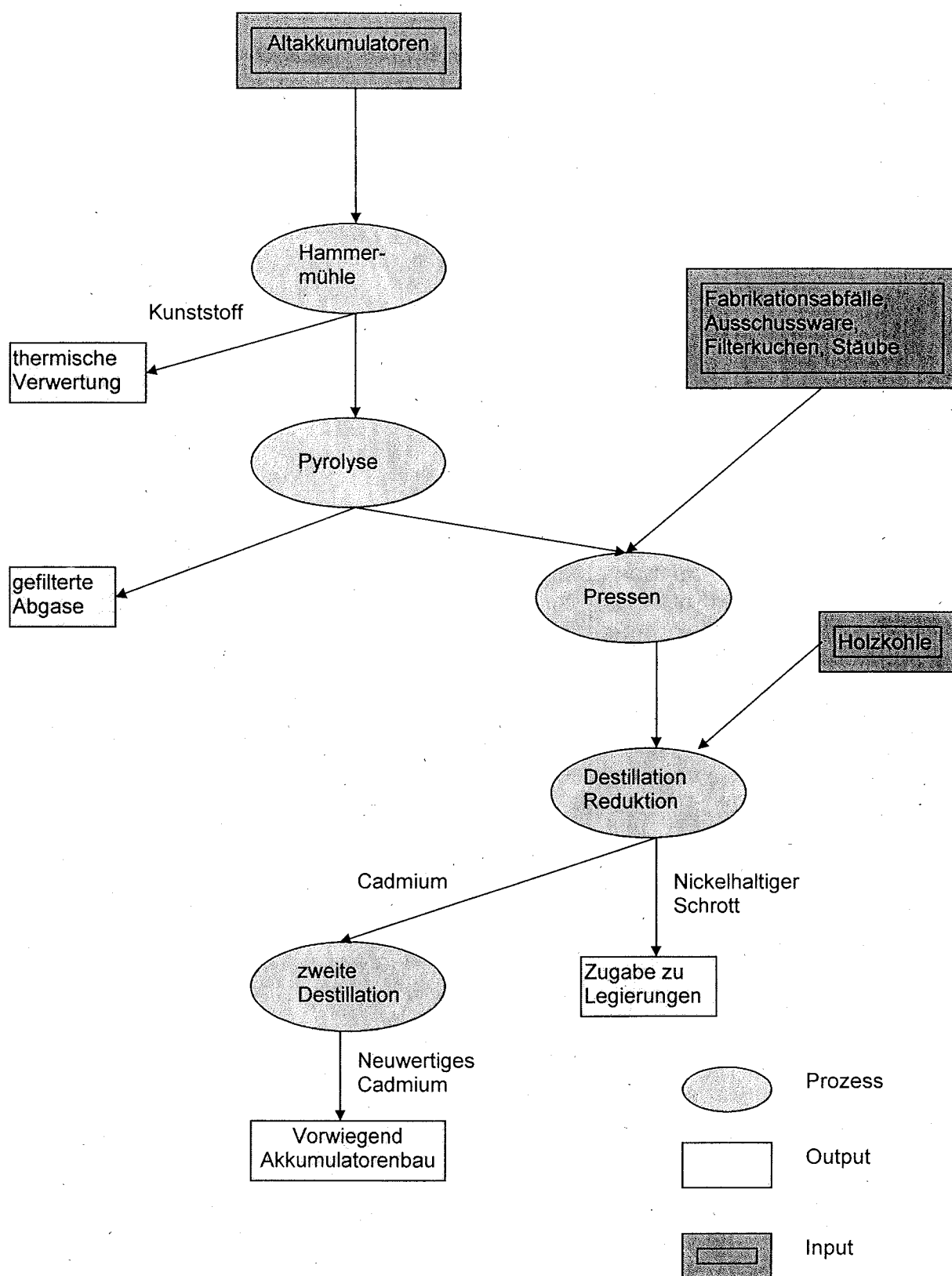


Abbildung 7: Verfahrensschritte der Entsorgung von Nickel-Cadmium-Akkumulatoren

Zu Emissionen, Energieverbräuchen und benötigten Hilfsmaterialien des Akkumulatorenrecyclings konnten keine quantitativen Angaben gefunden werden. Deshalb bestehen die Inputdaten für das Modul „Nickel-Cadmium-Akkumulatoren Entsorgung“ lediglich aus Angaben zu Abfällen und Recyclingprodukten. Der gesamte Kunststoffanteil von 312 g Polypropylen pro Akkumulatorensatz wird unter KVA bilanziert. Mangels anderer Daten wird, analog zum Bleirecycling, für den Wirkungsgrad Altcadmium/Recyclingcadmium 70% angenommen. Das heisst, von den 702 g Cadmium pro Batteriesatz können 491 g Recyclingcadmium gewonnen und wieder zu Akkumulatoren verarbeitet werden. Dieser Anteil Recyclingcadmium erscheint somit auch unter „Nickel-Cadmium-Akkumulatoren Herstellung“. Die restlichen 4,2 kg werden für Open-Loop-Recycling verwendet und erscheinen somit nicht in den Inputdaten (vgl. Kapitel 2.6 Recycling).

### 3.5.2 Elektronikschrott

#### a) Heutige Entsorgungspraxis

Um einen Einblick in die heutige Entsorgungspraxis von Elektronikschrott zu gewinnen, führte das Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung in Deutschland eine Befragung durch (vgl. Angerer 1993). 112 Fragebogen wurden an Betriebe verschickt, die entweder Elektronik enthaltende Geräte anbieten (z.B. Fernseher, Waschmaschine), Schrott sortieren und zerlegen oder Sekundärrohstoffe zurückgewinnen. Der Rücklauf lag bei 56% bzw. 63 Betrieben. Gefragt wurde, ob der Betrieb alte Elektrogeräte und Elektronikteile zurücknimmt und - sofern dies der Fall ist - ob Teile davon der direkten Wiederverwendung zugeführt, ob sie verarbeitet oder einem anderen Betrieb (Eisenhütten, Edelmetallscheideanstalten) zur Verwertung weitergegeben werden.

Mit den Resultaten dieser Umfrage sowie durch eigene Annahmen wird grob geschätzt, welche Anteile Elektronikschrott wie entsorgt werden. Mangels besserer Daten - viele Publikationen befassen sich mit möglichen Verwertungsverfahren, aber nicht mit der aktuellen Entsorgungssituation - muss diese vermutlich eher zu optimistische Schätzung benutzt werden. Zu optimistisch deshalb, weil wahrscheinlich vor allem diejenigen Betriebe geantwortet haben, die sich für die Umweltproblematik interessieren und ihre Firmen entsprechend umweltfreundlich gestalten.

Einem Artikel des Zürcher Tagesanzeigers (vgl. Tagesanzeiger 1996) kann entnommen werden, dass die Annahmen bezüglich Rücklaufquoten doch eher zu pessimistisch sind. So wird die Rücklaufquote im Bereich Büroelektronik, der etwa 40% des Elektronikschrotts liefert, mit 65% angegeben. Im Gegensatz zum Bereich Büroelektronik, wo das Recycling durch den Schweizerischen Wirtschaftsverband der Informations-, Kommunikations- und Organisationstechnik (SWICO) organisiert wird, besteht für die anderen Bereiche noch keine Organisation. Das Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) schreibt: „Ein beachtlicher Teil gelangt noch in den Siedlungsmüll oder unkontrolliert ins Ausland“ (vgl. BUWAL 1992). Bei einer pessimistischen Annahme von 0% Rücklaufquote für die Nicht-Büromaterialbereiche ergibt sich für den gesamten Elektronikschrott eine Rücklaufquote von 26% ( $40\% \cdot 65\% + 60\% \cdot 0\%$ ). Im Vergleich dazu wird in dieser Bilanzierung damit gerechnet,

dass 25% des gesamten Elektronikschrotts von den Anbietern zurückgenommen werden. In Abbildung 8 sind die beschriebenen Annahmen graphisch dargestellt.

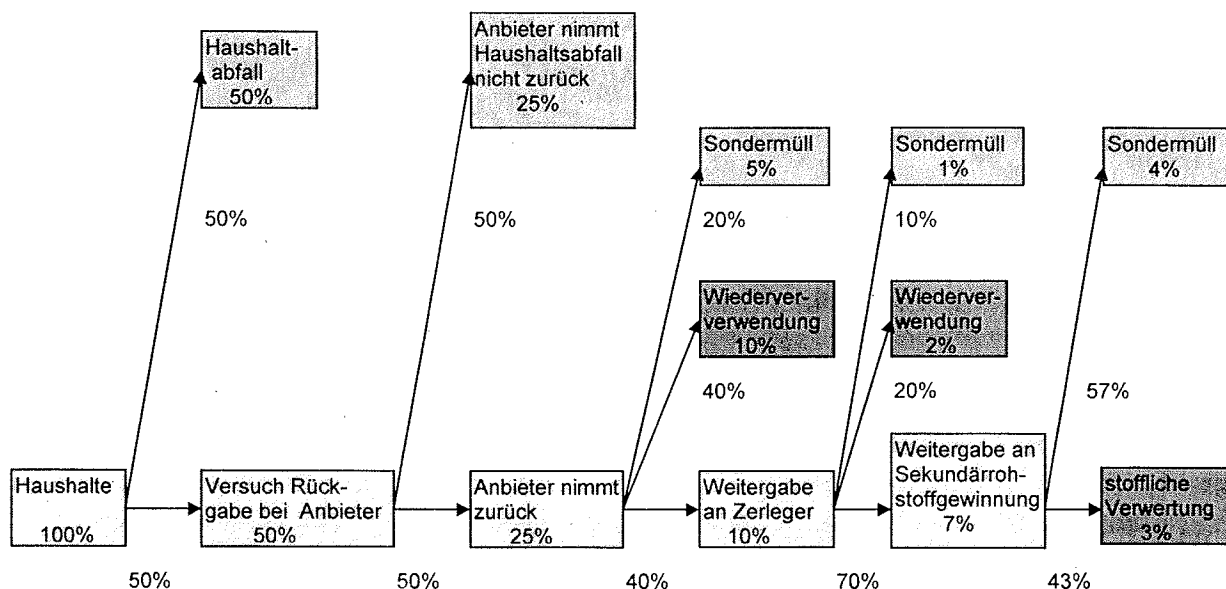


Abbildung 8: Annahmen zur Entsorgung von Elektronikschrott

Die Prozentzahlen auf den Pfeilen beziehen sich auf das Kästchen direkt davor als 100%, diejenigen in den Kästchen beziehen sich auf die gesamte Menge des in den Haushalten anfallenden Schrotts als 100%.

Von den vier Endstationen Haushaltsabfall mit insgesamt 75%, Sondermüll mit 10%, Wiederverwendung mit 12% und stoffliche Verwertung mit 3% ist die **Wiederverwendung** die umweltfreundlichste. Nach Wartung und Prüfung werden die Teile direkt wieder verwendet.

Zur **stofflichen Verwertung** ein Zitat von Angerer 1995: „Die andere Recyclingmethode; die stoffliche Verwertung, beschränkt sich (...) derzeit auf die Rückgewinnung der Metalle. Für die anderen enthaltenen Materialien (Kunststoffe, Glasfasern, Keramiken, Halbleiter u. a.) besteht kein wirtschaftlicher Anreiz für die Rückgewinnung. Die Zusammensetzung des Platinenschrotts, die durch grosse Materialvielfalt und innige Materialverbünde gekennzeichnet ist, erschwert die stoffliche Verwertung. In einigen Fällen werden die Kunststoffe der Platinen (...) zur Energiegewinnung verwendet. Die Verarbeitung von Platinenschrott erfolgt in mehreren Stufen. Zunächst werden die Metalle in einer mechanischen, thermischen oder chemischen Vorbehandlung von anderen Bestandteilen getrennt. Aus dem erhaltenen Metallgemisch werden metallurgisch die reinen Sekundärmetalle als Handelsprodukte zurückgewonnen...“. Bei diesen Prozessen können viele giftige Stoffe in die Atmosphäre gelangen (Schwermetalle, Stoffe aus der Verbrennung von brom- und chlorhaltigen Kunststoffen). Es fallen auch Schlacken an, die verschiedenste Stoffe enthalten.



Die Entsorgung als **Haushaltsabfall** ist sicherlich die schädlichste Entsorgungsmethode, denn sowohl die Reaktordeponien als auch die Müllverbrennungsanlagen sind nicht auf solche Stoffe ausgerichtet. So entstehen bei der Verbrennung unkontrolliert viele giftige Stoffe, die entweder in die Atmosphäre oder durch Filtrückstände auf Deponien gelangen. In den Reaktordeponien spielen sich zudem viele unkontrollierte Reaktionen ab, die zur Verschmutzung des Wassers und des Bodens führen.

Die **Sondermülldeponien** oder Sondermüllverbrennungsanlagen sind zwar besser für solche Stoffe eingerichtet. Es sind jedoch längst nicht alle Reaktionen und Stoffe bekannt, damit die Anlagen entsprechend ausgelegt werden können.

#### b) Anwendung der Elektronikschrottdaten für den FLYER

Die Übertragung dieser Elektronikschrottdaten auf den FLYER ist sehr hypothetisch, da die Fahrzeuge erst seit gut einem Jahr in Betrieb sind. Deshalb ist nicht bekannt, auf welchem Weg sie entsorgt werden. Vermutlich wird ein grosser Anteil der Fahrzeuge am Ende zu einem Fahrradhändler gebracht, der jedoch für die Entsorgung der Elektronik nicht eingerichtet sein dürfte und diese Teile eventuell in den Hausmüll werfen wird. Wird ein Fahrzeug bei einem Mofa/Roller-Händler oder bei einer Schrottverwertung zurückgegeben, besteht die Möglichkeit, dass die Komponenten aussortiert und weiterverwendet oder der Gewinnung von Sekundärrohstoffen zugeführt werden.

Bei einem Anteil von 426 g Elektronik pro FLYER führen diese Überlegungen zu folgenden Inputdaten:

Haushaltsabfall	75%	319 g
Sonderabfall	10%	43 g
Wiederverwendung	12%	51 g
stoffliche Verwertung	3%	13 g
<i>Total</i>	<i>100%</i>	<i>426 g</i>

*Tabelle 6: Anteile der Entsorgungsarten für Elektronikschrott*

### 3.5.3 Entsorgung der übrigen Teile

Die verbleibenden Teile, das heisst das eigentliche Fahrrad, der Motor, der Rahmenkoffer, die Kabel und andere Kleinteile werden nur grob bilanziert. Es wird geschätzt, wieviele Kilogramme auf welche Art entsorgt werden (Reaktordeponie, SAVA, Recycling, etc.). Energien und Transporte, die für die Entsorgung benötigt werden, wie auch entstehende Emissionen werden nicht berücksichtigt, da viele

Emissionen von Verbrennungsanlagen und Deponien gar nicht bekannt oder schwierig messbar sind. Es kann auch nicht verlässlich geschätzt werden, welcher Teil von welchem emittierten Schadstoff der Entsorgung des FLYERs anzulasten ist.

Nach einer mündlichen Auskunft der IG Velo Schweiz werden rund 10% der Altfahrräder zu Occasionen aufbereitet. Rund 50% werden gesondert entsorgt. Das heisst, Metallteile werden zu 95% stofflich wiederverwertet (Altmetall), das restliche Metall und die anderen Komponenten (Kunststoffe, Gummi, etc.) werden entweder in einer KVA verbrannt oder gelangen in eine Reaktordeponie. Laut Greenpeace 1991 werden in der Schweiz 80% des Hausmülls in einer KVA verbrannt und nur 20% auf einer Reaktordeponie gelagert. Die restlichen 40% der Altfahrräder werden gänzlich verbrannt bzw. deponiert.

Für Motor, Rahmenkoffer und Kleinteile wird eine gesonderte Entsorgung angenommen (siehe oben).

Die für diese Studie getroffenen Annahmen führen zu den folgenden Inputdaten für die Entsorgung der übrigen Teile (d.h. FLYER ohne Akkumulatoren und Elektronik):

[in kg]	Gewicht total	Metall	andere Komponenten	Verwendung als Occasion	Stoffliche Wiederverwertung (95% von Metall)	KVA (80% von andere Komponenten und 5% Metall)	Reaktordeponie (20% von andere Komponenten und 5% Metall)
Velo	14.275	12.1	2.175				
10% Occasionen	1.428			1.428			
50% gesonderte Entsorgung	7.138	6.05	1.088		5.748	1.112	0.278
40% Müll	5.71					4.568	1.142
Motor, Kiste, Kleinteile	7.534	7.215	0.319		6.854	0.544	0.136
Total	21.809			1.428	12.602	6.224	1.556

Tabelle 7: Anteile der Entsorgungsarten des FLYERs (ohne Akkus und Elektronik)

### 3.6 Verknüpfung mit Ökoinventaren

Der Sinn einer Ökobilanz ist, die Umweltauswirkungen eines Produktes über seinen gesamten Lebenszyklus zu erfassen (vgl. Kapitel 2.2). Deshalb reicht zum Beispiel das Wissen nicht aus, wieviel Blei es braucht, um einen Akkumulator herzustellen. Auch der Bleierzabbau und die Verhüttung müssen berücksichtigt werden. Viele solcher Basismaterialien oder Prozesse wie zum Beispiel Energiesysteme sind schon im Zusammenhang mit anderen Ökobilanzen bilanziert worden und stehen in Form von Ökoinventaren zur Verfügung. Für diese Arbeit wird vorwiegend auf zwei Quellen zurückgegriffen:

- Erstens auf die Daten, die an der EMPA St. Gallen erarbeitet worden sind. Diese sind im Computerprogramm EcoPro enthalten und in den Ökoinventaren für Verpackungen SRU 250 veröffentlicht (vgl. BUWAL 1996).
- Zweitens auf die Daten aus den Ökoinventaren für Energiesysteme der ETH Zürich (vgl. Frischknecht 1994).

Die für den FLYER benötigten Materialien sind für Energiesysteme nicht sehr relevant und werden deshalb in den Ökoinventaren für Energiesysteme nur grob bilanziert. Aufgrund der geringen Bilanztiefe werden die Umweltbeeinträchtigungen durch die Materialproduktion im allgemeinen unterschätzt (vgl. Angabe der Autoren der Ökoinventare für Energiesysteme). Für einige beim FLYER wichtige Materialien wie zum Beispiel Blei (Akkumulatoren) sollte deshalb eine von Grund auf neue Bilanzierung vorgenommen werden, was aber im Rahmen dieser Arbeit nicht geleistet werden kann. Deshalb wird trotzdem auf die Inventardaten zurückgegriffen. Diese Daten werden insofern ergänzt, als auch der Abraum berücksichtigt wird. Zum Teil werden auch die Daten von chemisch verwandten, schon bilanzierten Materialien verwendet. So wird anstatt Cadmium Zink und anstelle von Kalilauge Natronlauge bilanziert. Die Studie "Energetische und gesamtökologische Beurteilung verschiedener Antriebssysteme für Leichtmobile" (vgl. Ecosens 1995) wendet dieselbe Methode an.

Für gewisse Materialien konnten im Rahmen dieser Studie keine sinnvollen Daten gefunden werden. Diese Materialien werden deshalb einfach als Anzahl Kilogramm Verbrauch dieses Materials bilanziert und die Gewinnung nicht berücksichtigt. Auch die Emissionen und Abfälle werden nicht weiter aufgetrennt, da sie als eigentliche Indikatoren der Schädlichkeit eines Produktes dienen. Die Daten für die Energie- und Transportprozesse entstammen ursprünglich den Ökoinventaren für Energiesysteme, werden aber bei der Übernahme ins EcoPro dem Vorgehen der EMPA angepasst. Das heisst, Infrastrukturen werden in der Bilanz nicht berücksichtigt, und bei den Emissionen sind einige Stoffe zusammengefasst oder nicht berücksichtigt.

In Tabelle 8 werden alle verwendeten Materialien und Prozesse aufgelistet und die Datenquelle angegeben. Leere Felder in der dritten und vierten Spalte bedeuten, dass diese Materialien und Prozesse nicht weiter aufgetrennt werden.

	Verwendeter Name	Name Inventar	Quelle
<b>Material</b>	Stahl	ECCS	BUWAL SRU 250
	Stahl galvanisiert	Weissblech	BUWAL SRU 250
	Alu	Aluminiumbarren	BUWAL SRU 250
	Blei	Blei 0% Schrott	Ökoinventar Energiesysteme
	Recyclingblei		
	Kupfer	Kupfer (40% Sekundärkupfer)	Ökoinventar Energiesysteme
	Nickel	Nickel	Ökoinventar Energiesysteme
	Cadmium	Zink 0% Schrott	Ökoinventar Energiesysteme
	Recyclingcadmium		
	Kobalt		
	Titan		
	Polypropylen	PP-Granulat+Extrusion PE	BUWAL SRU 250
	Polyethylen	PE-Granulat+Extrusion PE	BUWAL SRU 250
	Polyvinylchlorid	PVC-Pulver+ Extrusion PE	BUWAL SRU 250
	Gummi	Gummi EPDM	Ökoinventar Energiesysteme
	Glas	Weissglas	BUWAL SRU 250
	Teflon		
	Araldit		
	Kalilauge	Natronlauge	BUWAL SRU 250
	Schwefelsäure konzentriert	Schwefelsäure	BUWAL SRU 250
	Destilliertes Wasser		
	Sauerstoff		
	Acetylen		
	Argon		
	Fluxgas		
	Flussmittel		
	Ultraformula		
	Grundierung		
	Farbe		
	Klarlack		
	Elektronik		
<b>Energieverbrauch</b>	Strom Mittelspannung UCPT	Elektrische Energie UCPT (Mittelspannung)	BUWAL SRU 250
	Strom Mittelspannung CH	Elektrische Energie CH (Mittelspannung)	BUWAL SRU 250
	Strom Niederspannung CH	Elektrische Energie CH (Mittelspannung) + 12%	BUWAL SRU 250
	Heizöl	Heizöl	BUWAL SRU 250
	Erdgas	Erdgas	BUWAL SRU 250
	Kohle	Kohle	BUWAL SRU 250
	chemische Energie		
	Propan		BUWAL SRU 250
<b>Transporte</b>	Hochseefrachter	Hochseefrachter	BUWAL SRU 250
	Bahn CH	Bahn CH	BUWAL SRU 250
	Bahn UCPT	Bahn UCPT	BUWAL SRU 250
	LKW 28t	LKW 28t	BUWAL SRU 250

Tabelle 8: Verknüpfungen mit anderen Ökoinventaren

## 4. Inputdaten Substitutionsfahrzeuge

Unter Substitutionsfahrzeugen werden in dieser Studie Verkehrsmittel verstanden, die durch eine FLYER-Fahrt ersetzt werden. Betrachtet werden Fahrräder, motorisierte Zweiräder, Personenwagen (PW) und öffentliche Verkehrsmittel für den Nahverkehr. Leichtelektromobile (LEM) werden nicht als Substitutionsfahrzeuge betrachtet: Aus verschiedenen Gründen kann angenommen werden, dass nur ein kleiner Prozentsatz an Personen eine LEM-Fahrt durch eine FLYER-Fahrt ersetzen wird.

### 4.1 Fahrrad

Für die Bilanzierung der Herstellung eines Fahrrads werden die Daten des Moduls Fahrrad des FLYERs übernommen (vgl. Anhang 1). Der Betrieb wird durch die chemische Energie, die durch den Fahrer bereitgestellt wird, bilanziert. Nicht beachtet wird die Bereitstellung der Nahrungsmittel. Beim Fahrradfahren wird von einem Energieverbrauch von 1200 kJ pro Stunde Fahrradfahren mit 15 km/h ausgegangen (vgl. Interkantonale Lehrmittelzentrale 1987). Mit dem vergleichbaren Kraftaufwand wird mit dem FLYER mit 30 km/h gefahren - der Motor liefert die restliche Energie. Für 40'000 km werden somit 1600 MJ verbraucht.

Beim Unterhalt werden die nicht FLYER-spezifischen Verschleissteile Pneu, Kette, Alukranz und Fahrradglühbirne berücksichtigt (vgl. Tabelle 5).

Die Entsorgung wird analog zum FLYER bilanziert (vgl. Kapitel 3.5.3 Entsorgung der übrigen Teile). Die Lebensdauer wird ebenfalls analog zum FLYER mit 40'000 km angenommen.

### 4.2 Motorisierte Zweiräder

Die motorisierten Zweiräder werden in drei Kategorien aufgeteilt: **Motorfahrrad, Roller und Motorrad**. Für die Erhebung der Daten zur stofflichen Zusammensetzung, zu den Transportdistanzen und zum Treibstoffverbrauch wurden mehrere Händler, Importeure und Benutzer solcher Fahrzeuge befragt. Aus diesen Quellen wird ein Durchschnittswert gebildet, der als grobe Schätzung zu verstehen ist. Der Benzinverbrauch der Motorfahrräder wird bewusst etwas höher gewählt als der Durchschnitt der Befragungsergebnisse, da die genannten Werte für neue Modelle gelten und bei den Motorfahrrädern ein hoher Anteil an alten Fahrzeugen besteht, die einen höheren Verbrauch aufweisen.

In der folgenden Tabelle sind die in den Berechnungen verwendeten Durchschnittswerte pro Fahrzeug dargestellt (zur Herleitung vgl. auch Anhang 4).

Kriterium	Mofa (Durchschnittswert)	Roller (Durchschnittswert)	Motorrad (Durchschnittswert)
Entfernung des Herstellungsortes	14'700 km	14'700 km	14'700 km
Materialien: Kunststoffe	0,5 kg	8 kg	5 kg
Metalle:			
Stahl	40 kg	55 kg	80 kg
Alu	7 kg	37 kg	95 kg
Gewicht	48 kg	100 kg	180 kg
Verbrauch pro 100 km	2,5 lt	3,5 lt	6,5 lt

Tabelle 9: Übersicht zu den Durchschnittswerten der Händlerbefragung

Daten zu den Betriebsemissionen dieser Fahrzeuge werden der Studie „Ermittlung von Abgas-Emissionsfaktoren von motorisierten Zweirädern in der Schweiz“ entnommen (vgl. Ingenieurschule Biel/ISB 1995).

In der Studie der Ingenieurschule Biel wurden folgende Fahrzeugkategorien gebildet: Motorfahrräder; Motorräder < 50 cm<sup>3</sup>, 2-Takt; Motorräder > 50 cm<sup>3</sup>, 2- und 4-Takt. Dies deckt sich nicht genau mit der Aufteilung nach Mofa, Roller und Motorrad in der vorliegenden Studie. Eine Rücksprache mit der Ingenieurschule Biel ergab, dass die Daten der Kategorie Motorräder < 50 cm<sup>3</sup> als grobe Annäherung für die Emissionen der Roller verwendet werden können. Die Werte sind tendenziell zu hoch, da es auch Roller mit 4-Takt-Motoren gibt und diese Fahrzeuge oft mit modernen, emissionssenkenden Technologien ausgerüstet sind. Im allgemeinen sind aber wohl alle Werte eher etwas zu tief, da in der Praxis dynamischer gefahren wird als bei den verwendeten Testzyklen. Diese Tendenz lässt sich gut erkennen beim Vergleich der Verbrauchszahlen der ISB-Studie (vgl. Tabelle 10) mit den Werten der Händlerumfrage, wie sie in Tabelle 9 dargestellt sind.

Für die Motorfahrräder werden die Emissionswerte bei Höchstgeschwindigkeit benutzt, da diese Fahrzeuge laut Ingenieurschule Biel meist mit Vollgas gefahren werden. Für die beiden anderen Kategorien werden die Emissionswerte beim ECE-Stadtfahrzyklus (nach EG-Regelung 91/441/EWG) verwendet. Für die Motorfahrräder wird ein Anteil von je 50% für Fahrzeuge mit Katalysator bzw. für Fahrzeuge ohne Katalysator angenommen (eigene Schätzung, da kein auswertbarer Datensatz zur Verfügung stand). Die Unterschiede mit bzw. ohne Katalysator betragen durchschnittlich 30%. Die Testfahrzeuge der Kategorie Motorräder < 50 cm<sup>3</sup> waren nicht mit Katalysator ausgerüstet.

Bei der Kategorie Motorräder > 50 cm<sup>3</sup> wird die Verteilung des Alters der Fahrzeuge (unterschiedlich strenge Abgasgesetzgebungen), die Grösse des Motors wie auch die Verteilung von 4- bzw. 2-Takt-Motoren anhand von Datensätzen des Bundesamtes für Statistik berücksichtigt (vgl. Ingenieurschule Biel 1995).

In der folgenden Tabelle sind die Emissionsdaten und Treibstoffverbräuche der drei Fahrzeugkategorien zusammengestellt:

	Motorfahrrad	Motorrad < 50 cm <sup>3</sup>	Motorrad > 50 cm <sup>3</sup>
CO	719 g	1160 g	2068 g
NO <sub>x</sub>	0,63 g	0,16 g	8,3 g
CO <sub>2</sub>	2640 g	2890 g	7906 g
Benzinverbrauch	1,9 lt	2,7 lt	5,7 lt

Tabelle 10: Emissionswerte motorisierter Zweiräder pro 100 Kilometer (ISB-Studie)

Für die Berechnung der Inputdaten werden die Werte aus Tabelle 9 und Tabelle 10 verwendet. Die **Materialdaten** aus Tabelle 9 werden mit der Annahme einer **Lebensdauer** von 30'000 km für Mofas, 50'000 km für Roller und 70'000 km für Motorräder auf die Bezugseinheit Personenkilometer umgerechnet.

Für den **Transport** werden als grobe Schätzung folgende Zahlen angenommen (vgl. Maibach 1995):

- Japan: 27'500 km Hochseefrachter, 1'000 km Bahn, 150 km LKW 28t
- Europa: 600 km Bahn, 150 km LKW 28t

Beim **Treibstoffverbrauch** werden praxisgerecht die Daten aus Tabelle 9 verwendet. Der Ölanteil des Treibstoffes, welcher zwischen 0.05% und 1% liegt, wird mangels geeigneter Inventardaten beim Treibstoffverbrauch als Benzin bilanziert. Die **Luftemissionen** werden mit dem in der Praxis verwendeten Gemisch ermittelt. Die Dichte von Benzin wird mit 0,73 kg/lt angenommen.

Die **Entsorgung** wird wie beim FLYER bilanziert: Kunststoffe gelangen in eine Inertstoffdeponie und Metalle ins Open-Loop-Recycling (vgl. Kapitel 2.6 Recycling). Die aus diesen Überlegungen resultierenden Inputdaten sind in Anhang 1 zu finden.

Die pro Fahrzeugtyp vorliegenden Inputdaten müssen zur besseren Vergleichbarkeit in Personenkilometer umgerechnet werden. Dabei wird angenommen, dass die motorisierten Zweiräder ohne Beifahrer gefahren werden. Diese Annahme wird aus dem Grund getroffen, da der FLYER vorwiegend für den Arbeitsweg und Einkaufsfahrten eingesetzt wird, wo kaum ein Beifahrer mitreist. Die Lebensdauer wird wie oben beschrieben angenommen.

### 4.3 PW, Regionalbus, Tram, Regionalzug

Für die Bilanzierung von Personenwagen (PW), Regionalbus, Tram und Regionalzug werden die Daten aus dem Ökoinventar Transporte verwendet (vgl. Maibach 1995). Folgende Module wurden benutzt:

- PKW CH Durchschnitt
- Regionalbus CH EURO1
- Tram CH-Mix und
- Bahn Regionalzug SBB-Mix.

Analog zur Bilanz des FLYERs kann die Infrastruktur weggelassen werden, da die Daten nach Abschnitt des Produktlebenszyklus getrennt vorliegen. Mit Infrastruktur sind hier Strassen, Parkplätze, Schienen, usw. gemeint. Folgender Abschnitt aus dem Bericht des Ökoinventars Transporte soll die Systemgrenzen verdeutlichen (vgl. Maibach 1995):

„Die **Herstellung** der Fahrzeuge umfasst die Material- und Energieaufwendungen der Produktion sowie die daraus entstehenden Emissionen. Die Prozesskette bei der Fahrzeugherstellung beinhaltet die Herstellung der Grundmaterialien, die Aufwendungen der weiteren Verarbeitungsstufen sowie die energetischen Prozesse. Eine lückenlose Bilanzierung dieser Prozesskette ist nicht möglich, weshalb mit relativ pauschalen Annahmen versucht wurde, die Belastungen zu erfassen. Nicht berücksichtigt werden die Produktion und die Entsorgung der Produktionsmittel selber (Fabrikationshallen, Produktionsmaschinen, usw.).

Der **Fahrzeugunterhalt** wurde ebenfalls anhand der Material- und Energieaufwendungen und der spezifischen Emissionen (z.B. Lackieren) erfasst. Inbegriffen ist hier der Betrieb der Werkstätten (Strom- und Heizölverbrauch).

Der **Betrieb** der Fahrzeuge umfasst einerseits die direkten Emissionen des Verbrennungsvorgangs sowie weitere Emissionen (z.B. Reifenabrieb, Fahrdrabrieb bei Schienenfahrzeugen, usw.), andererseits sind auch die Umweltwirkungen der Bereitstellung der Betriebsmittel (Pre-combustion: Prospektion, Förderung, Transport, usw.) erfasst. Hier liegen in den Ökoinventaren für Energiesysteme (vgl. Frischknecht 1994) relativ detaillierte Zahlen über die gesamten Prozessketten vor. Die Pre-combustion macht einen nicht unbeträchtlichen Teil der Aufwendungen und Auswirkungen beim Betrieb aus.

Bei der **Entsorgung** der Fahrzeuge wurden die nicht rezyklierbaren Anteile gemäss den heutigen Entsorgungswegen bilanziert.

Diese Systemgrenzen decken sich im wesentlichen mit denjenigen der Bilanzierung des FLYERs. Es bestehen die folgenden Unterschiede: Im Ökoinventar Transporte wird der Betrieb der Werkstätten ebenfalls berücksichtigt. Dies entspricht nicht dem Konzept, die Infrastruktur analog zum Vorgehen der EMPA St. Gallen wegzulassen. Beim Personenwagen macht der Betrieb der Werkstätten ungefähr 2% aus. Emissionen wie der Reifenabrieb werden beim FLYER nicht beachtet, da sie schon



beim Personenwagen im Mikrogrammbereich liegen. Die entsprechenden Inputdaten sind in Anhang 1 zu finden.

Für die Umrechnung in Personenkilometer wird im Ökoinventar Transporte mit den heutigen in der Schweiz geltenden durchschnittlichen Auslastungen gerechnet. In Tabelle 11 sind die entsprechenden Zahlen für die bilanzierten Fahrzeuge dargestellt.

Verkehrsmittel	Auslastung		Kapazität Personen
	absolut Personen	relativ	
PW	1.72	34%	5
Regionalbus	16.4	41%	40
Tram	28	18%	160
Regionalzug	32	17%	193

*Tabelle 11: Auslastung und Kapazität von PW, Regionalbus, Tram und Regionalzug*

Für die Lebensfahrleistung werden folgende Werte angenommen:

- PW: 150'000 km
- Regionalbus: 540'000 km
- Tram: 1'115'250 km
- Lokomotive: 9'600'000 km
- Regionalzug: 1'160'000 km

Die zukünftige Entwicklung wird im Ökoinventar Transporte folgendermassen geschildert: „Dank dem Katalysator kann der Benzin-PW seine spezifischen Emissionen gegenüber dem heutigen Durchschnitt noch weiter verringern....Ganz allgemein zeigt sich allerdings, dass einzig bei den Luftschadstoffemissionen des Strassenverkehrs in Zukunft signifikante Verbesserungen zu erwarten sind....Bei den anderen Umweltbelastungen bzw. Verkehrsmitteln sind solche Verbesserungen nicht in gleichem Masse verordnet, obwohl teilweise auch technische Potentiale vorhanden sind. Dies gilt insbesondere für den Energieverbrauch im Strassenverkehr (kleinere Fahrzeuge) und die Lärmverbesserungen bei der Bahn“ (vgl. Maibach 1995).

## 5. Auswertung

In diesem Kapitel werden die Resultate der Bilanzierung vorgestellt und interpretiert. Wie in Kapitel 2.6 Methoden zur Auswertung beschrieben, wird nach zwei unterschiedlichen Ansätzen vorgegangen. Zuerst werden die Fahrzeuge anhand bestimmter Schlüsselgrössen verglichen. Anschliessend werden mittels verschiedener Bewertungsmethoden die verschiedenen Umweltauswirkungen aggregiert und die Fahrzeuge anhand dieser Grössen verglichen. Dabei wird vollständig auf die Betrachtung von Lärm verzichtet, da diese Grösse schwierig zu erfassen und zu bewerten ist und beim Betrieb eines FLYERs kein Problem darstellt.

### 5.1 Vergleich von Schlüsselgrössen

In einem ersten Schritt wird der FLYER mit Bleiakkumulatoren (FLYER Pb) und der FLYER mit Nickel-Cadmium-Akkumulatoren (FLYER NiCd) miteinander verglichen. Der Vergleich basiert auf der detaillierten Analyse der Grössen, die sich bei den zwei Modellen wesentlich unterscheiden. In einem zweiten Schritt werden die FLYER-Modelle wie auch die Substitutionsfahrzeuge anhand der in Anhang 3 aufgeführten Grössen verglichen.

#### 5.1.1 Vergleich FLYER Pb und FLYER NiCd

Der einzige Unterschied zwischen diesen beiden Fahrzeugen liegt in den Batterien (Blei bzw. Nickel/Cadmium) – deshalb werden bei diesem Vergleich nur die Batterien betrachtet. Diskutiert werden die Bereiche Energie, Abfall und SO<sub>2</sub>-Ausstoss.

##### a) Energie

Weitaus die meiste Endenergie wird in den Betrieben bei der Herstellung der Akkumulatoren benötigt. Die Lebensphase „**Herstellung**“ enthält dabei sowohl die Prozessenergie als auch den Energieverbrauch zur Materialbereitstellung und zum Transport der Akkumulatoren aus Japan.

Unter „**Unterhalt**“ wird die Herstellung und Entsorgung der Ersatzbatteriesätze verbucht. Diese Werte sind also lediglich ein Vielfaches der Werte der Herstellung und Entsorgung des ersten Satzes. Ein Vergleich dieser Lebensphase bringt also keine neuen Erkenntnisse und wird deshalb nicht durchgeführt.

Die „**Entsorgung**“ braucht vergleichsweise wenig Energie (rund 10%). Zudem liegen nur Werte für die Entsorgung der Bleibatterien vor, so dass in diesem Punkt ein expliziter Vergleich nicht sinnvoll ist.

Als „Satz Akkumulatoren“ wird wie erwähnt die beim FLYER benötigte Akkumulatorenkapazität bezeichnet: z.B. ergeben zwei Bleiakkumulatoren zu je 12V/17 Ah in Serie geschaltet den Satz Akkumulatoren für den FLYER Pb.

Beim Vergleich der Herstellung eines Satzes Bleiakkumulatoren mit der Herstellung eines Satzes Nickel/Cadmium-Akkumulatoren fällt auf, dass der Energieaufwand für Transporte und die Prozessenergie für Bleiakkumulatoren gut doppelt so gross ist wie für Nickel/Cadmium-Akkumulatoren (vgl. Abbildung 9). Der Grund liegt darin, dass für beide Akkumulatoren dieselben Transportdistanzen und -fahrzeuge angenommen werden und der Energieverbrauch somit nur vom transportierten Gewicht abhängt. Dieses ist bei Bleiakkumulatoren (12,5 kg) gut doppelt so hoch wie bei Nickel/Cadmium-Akkumulatoren (5,4 kg). Dasselbe gilt für die Prozessenergie, die nach Gewicht geschätzt wird (vgl. Kapitel 3 Inputdaten). Bei der Bereitstellung der Materialien ist die Situation gerade umgekehrt: Die Bereitstellung der Materialien für die Nickel/Cadmium-Akkumulatoren ist um einiges energieintensiver als für die Bleiakkumulatoren.

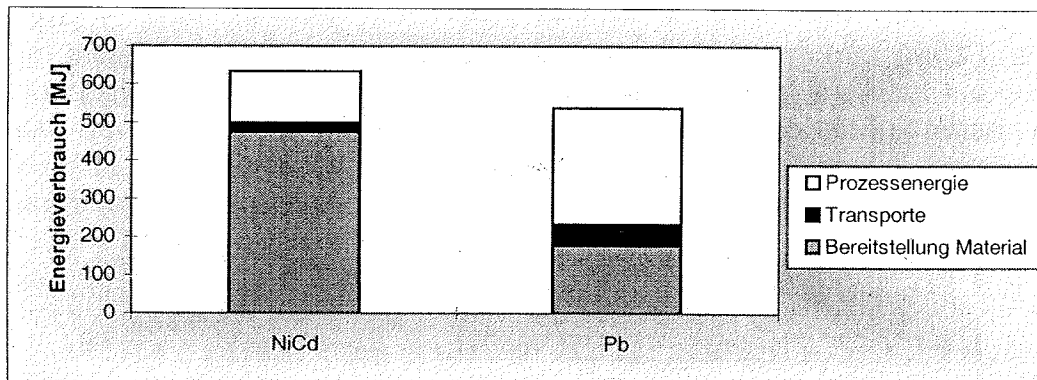


Abbildung 9: Vergleich des Energieverbrauchs **zur Herstellung eines Satzes Blei- bzw. Nickel/Cadmium-Akkumulatoren**, aufgetrennt nach Bereitstellung des Materials, Transporte und Prozessenergie.

Durch die Aufteilung des Gesamtenergiebetrags auf die Hauptmaterialien (vgl. Abbildung 10) wird ersichtlich, dass die Bereitstellung von Nickel den weitaus grössten Anteil ausmacht: Die Materialbereitstellung ist sehr energieintensiv, und es wird eine grosse Menge Nickel gebraucht. Zu bemerken ist, dass die Daten zur Nickelbereitstellung wie auch diejenigen zur Bereitstellung anderer Materialien in Frischknecht 1994 nur oberflächlich bilanziert und zum Teil veraltet sind.

Die aufwendige Materialbereitstellung überwiegt sogar den Gewichtsvorteil der Nickel/Cadmium-Akkumulatoren, so dass die gesamte Herstellung eines Satzes Nickel/Cadmium-Akkumulatoren mehr Energie braucht als die Herstellung eines Satzes Bleiakkumulatoren.

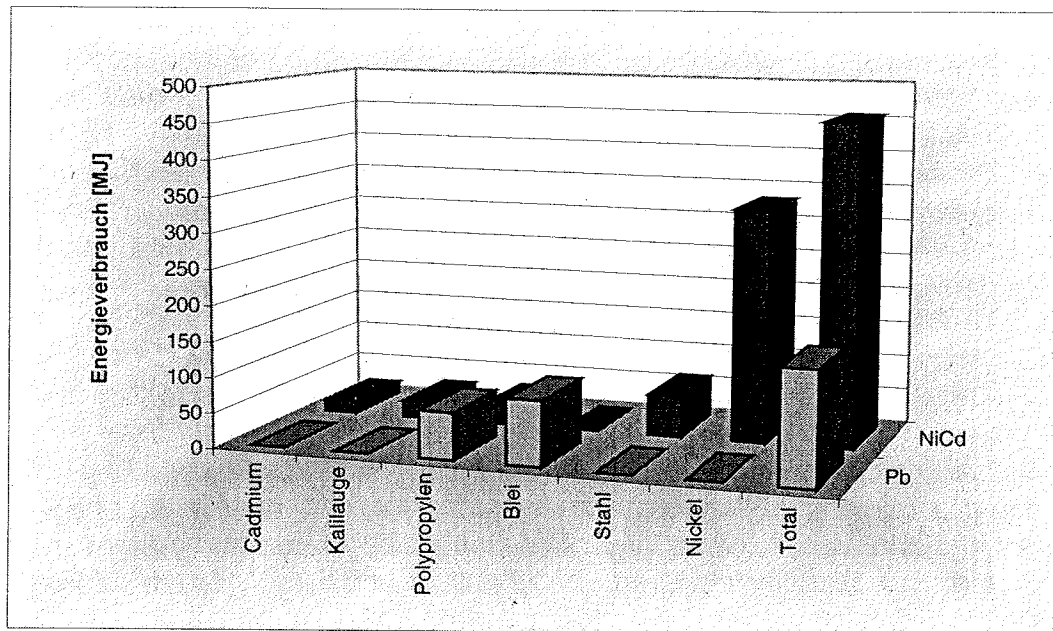


Abbildung 10: Energieverbrauch zur Herstellung der Hauptmaterialien **pro Akkusatz**

Da die Lebensdauer eines Satzes Bleiakkumulatoren (8'800 km) deutlich kürzer ist als diejenige eines Satzes Nickel/Cadmium-Akkumulatoren (30'000 km), kehrt sich dieses Verhältnis wieder (vgl. Abbildung 11): Bei der Betrachtung der Gesamtlebensdauer eines FLYERs ist aufgrund des Energieverbrauchs für die Herstellung der Akkumulatoren der FLYER NiCd vorzuziehen.

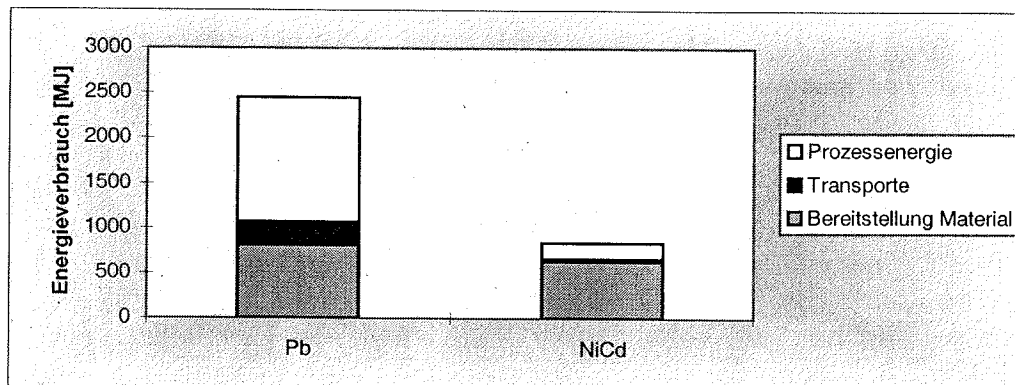


Abbildung 11: Vergleich des Energieverbrauchs zur Herstellung von Blei- bzw. Nickel/Cadmium-Akkumulatoren für die Lebensdauer eines FLYERs, aufgetrennt nach Bereitstellung des Materials, Transporte und Prozessenergie.

Die Annahme bezüglich der Lebensdauer (vgl. Abschnitt 3.3.1) hat einen grossen Einfluss auf die Resultate. Die Lebensdauer wird grösstenteils durch die Wahl des Ladegerätes und damit der gesamten Ladezyklenzahl bestimmt. Die Annahme der

relativ optimistischen Lebensdauer für die Nickel/Cadmium-Akkumulatoren kann damit begründet werden, dass BKTech erst auf Nickel/Cadmium-Akkumulatoren umsteigen wird, wenn ein Ladegerät auf dem Markt ist, welches eine hohe Lebensdauer der Akkumulatoren garantiert.

Der Vergleich der beiden Akkumulatortypen bezüglich der Herstellungsenergie zeigt deutlich, wie wichtig bei der Interpretation von Resultaten von Ökobilanzen die transparente Darstellung der dazu getroffenen Annahmen ist. Ohne diesen Hintergrund können Daten zu falschen Interpretationen und Entscheiden führen.

## b) Abfälle

Bei den Abfällen zeigt sich ebenfalls ein wesentlicher Unterschied zwischen Blei- und Nickel-Cadmium-Akkumulatoren. Mit Abstand der grösste Anteil des Abfalls entsteht beim Erzabbau in Form von Abraum (vgl. Abbildung 12). Darunter versteht man Deckschichten über den Metallagerstätten, die ebenfalls abgebaut werden müssen. Die Bleiakкумуляtoren verursachen dabei fast doppelt soviel Abraum und anderen Abfall wie die NiCd-Akkumulatoren.

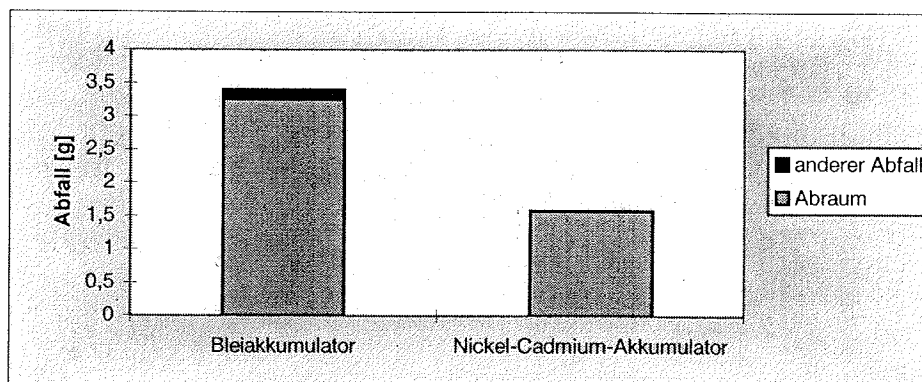


Abbildung 12: Abfall der Akkumulatoren **pro Personenkilometer**, aufgetrennt nach Abraum und anderem Abfall.

Der Metallgehalt der abgebauten Gesteine bzw. der anfallende Abraum pro Tonne Metall ist eine Grösse, die je nach Abbaug Gebiet sehr stark variieren kann. Frischknecht 1994 schätzt für Blei einen Metallgehalt von 10% und für Nickel 7%. Mit anderen Worten: Pro Tonne Blei fällt zwar weniger Abraum an - die Herstellung eines Satzes Bleiakкумуляtoren benötigt jedoch mehr Material als die Herstellung eines Satzes Nickel-Cadmium-Akkumulatoren. Zusätzlich ist die Lebensdauer der Bleiakкумуляtoren geringer. Damit wird die Differenz des Abfallvolumens der beiden FLYER-Modelle erklärt.

Abbildung 12 zeigt den Anteil des Abraumes am gesamten Abfall, welcher durch die Akkumulatoren entsteht. Aufgrund des angenommenen Metallgehaltes dürfte dieser Anteil höchstens 90% bzw. 93% betragen. Begründet werden die Anteile von 90% bzw. von 93% damit, dass der grösste Teil des Metalles recycelt wird und nach Gebrauch nicht als Abfall anfällt. Unter „anderer Abfall“ sind also vorwiegend die nichtmetallischen Teile der Akkumulatoren zu finden.

Abbildung 13 zeigt, dass die Akkumulatoren einen wesentlichen Teil des Abfalles des FLYERs ausmachen. Die Differenz zwischen den beiden Akkumulatortypen führt dadurch zu einer erheblichen Differenz auch beim Betrachten der kompletten Fahrzeuge.

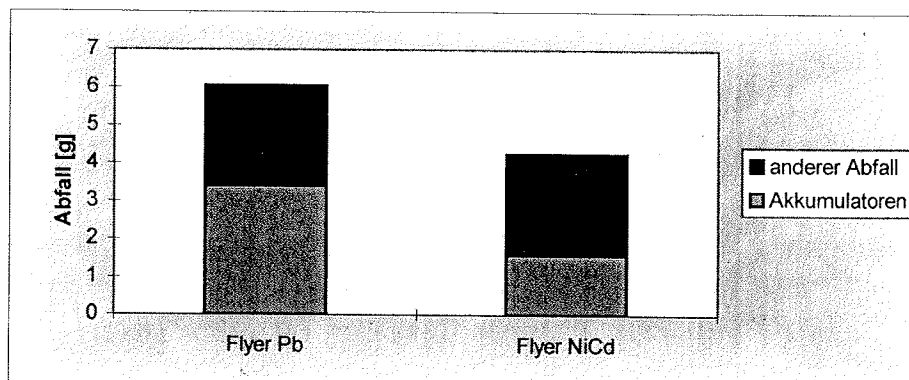


Abbildung 13: Anteil des Akkumulatorabfalls am Abfall **des gesamten FLYERs pro Personenkilometer**

### c) Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>)

Bei den betrachteten Luftemissionen (vgl. Anhang 3) verhalten sich die beiden FLYER-Modelle sehr ähnlich. Nur bezüglich Schwefeldioxid SO<sub>2</sub> besteht ein erheblicher Unterschied. Abbildung 14 zeigt, dass beim FLYER mit Nickel-Cadmium-Akkumulatoren der grösste Teil der Schwefeldioxidemissionen von den Akkumulatoren stammt. Bei den Akkumulatoren wiederum stammen die Schwefeldioxid-Emissionen beinahe ausschliesslich aus der Verhüttung des Nickels.

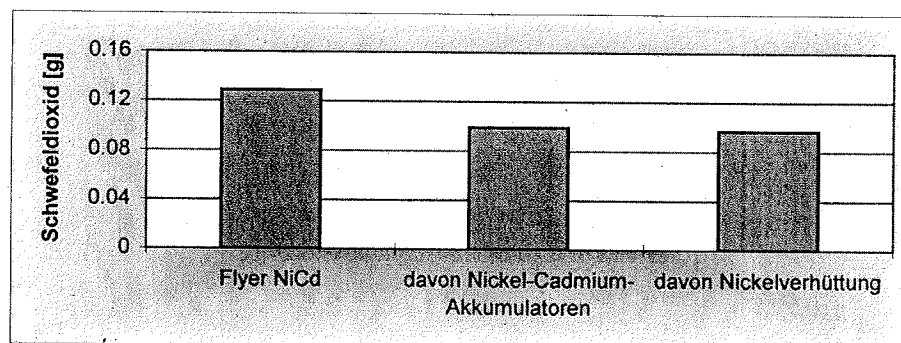


Abbildung 14: Schwefeldioxid-Emissionen **pro Personenkilometer** des FLYERs, davon der Anteil der Akkumulatoren, davon der Anteil der Nickelverhüttung

Laut Frischknecht 1994 werden beim Abbau und bei der Raffinierung des sulfidischen Nickelerzes grosse Mengen SO<sub>2</sub> emittiert. Je nach Abbauort schwanken diese Werte erheblich. Analog zu den Ökoinventaren für Energiesysteme wird hier mit einem Wert von 2 kg SO<sub>2</sub> pro kg Nickel gerechnet. Für die Bleiproduktion werden

in Frischknecht 1994 keine  $\text{SO}_2$ -Emissionen ausgewiesen, obschon Blei oft ebenfalls aus sulfidischen Erzen gewonnen wird (vgl. Trüeb 1996).

Der Unterschied zwischen dem FLYER Pb und dem FLYER NiCd bezüglich  $\text{SO}_2$ -Emissionen sollte also nicht zu stark gewichtet werden: Die Annahmen sind schwierig abzuschätzen, da sehr grosse Unterschiede zwischen den Lagerstätten bestehen und das  $\text{SO}_2$  teilweise zu Schwefelsäure verarbeitet wird.

#### d) Ist der FLYER Pb umweltfreundlicher als der FLYER NiCd?

Die bisherigen Ausführungen zeigen, dass sich diese Frage so nicht eindeutig beantworten lässt - verschiedene Faktoren müssen berücksichtigt und teilweise auch der persönlichen Wertung überlassen werden.

Zusammenfassend lässt sich festhalten:

##### Vergleich des FLYER Pb und des FLYER NiCd bezüglich:

###### a) ENERGIE:

Die gesamte Herstellung **eines Satzes** Nickel/Cadmium-Akkumulatoren braucht wegen der aufwendigen Materialbereitstellung des Nickels mehr Energie als die Herstellung eines Satzes Bleiakkumulatoren.

Wird die **Gesamtlebensdauer** der Akkumulatoren betrachtet, kehrt sich dieses Verhältnis für den Einsatz beim FLYER gerade um: Durch die höhere Lebensdauer der Nickel-Cadmium-Akkumulatoren müssen diese weniger oft ersetzt

werden und brauchen deshalb für die Herstellung pro Personenkilometer insgesamt weniger Energie als die Bleiakkumulatoren.

###### b) ABFÄLLE:

Der grösste Anteil des Abfalls entsteht beim Erzabbau in Form von Abraum. Die Bleiakkumulatoren verursachen **pro Personenkilometer** fast doppelt soviel Abraum und andere Abfälle als die NiCd-Akkumulatoren.

###### c) LUFTEMISSIONEN:

Bei den untersuchten Luftemissionen weisen die beiden FLYER-Modelle praktisch identische Werte auf - ausser beim **Schwefeldioxid ( $\text{SO}_2$ )**.

Der FLYER Pb weist beim  $\text{SO}_2$  deutlich bessere Werte auf als der FLYER NiCd, da die Schwefeldioxid-Emissionen bei Akkumulatoren fast ausschliesslich aus der Verhüttung des Nickels stammen.

Diese Unterschiede stellen aus folgenden Gründen relativ unsichere Ergebnisse dar:

- Teilweise sind nur grobe Bilanzierungen der Basismaterialien in den Ökoinventaren für Transporte enthalten.
- Die Ausgangsmaterialien und die Verarbeitungsprozesse für dasselbe Metall können sich stark unterscheiden.
- Teilweise sind die Daten veraltet.
- Der wichtige Unterschied der Toxizität von Blei- und Cadmium-Emissionen konnte hier nicht berücksichtigt werden, da zu diesem Bereich praktisch keine Daten vorliegen.

Ein Beispiel soll die Schwierigkeiten des Vergleichs der beiden FLYER-Modelle erläutern. Durch das Cadmium als giftiges Schwermetall weist der FLYER NiCd gegenüber dem FLYER Pb gewichtige Nachteile auf. Wird jedoch das Gefährdungspotential als Argument verwendet, wären wiederum die NiCd-Akkumulatoren vorzuziehen: Die Gefährdung ist umso kleiner, je weniger potentiell gefährliche Stoffe im Umlauf sind. Für den FLYER NiCd gilt dies wiederum nur unter der Bedingung, dass ein Ladegerät verfügbar ist, welches eine erheblich höhere Zyklenzahl ermöglicht als bei den Bleiakkumulatoren.

Der Forschungsbedarf auf dem Gebiet der Umweltauswirkungen von Akkumulatoren ist gross. Erst mit einer vollständigen und sicheren Datengrundlage werden sinnvolle Aussagen möglich. In Anbetracht des grossen Potentials an Verwendungen von Akkumulatoren im Verkehrsbereich ist es notwendig, diese Datenlücken so rasch wie möglich zu schliessen. Innovative Entwicklungen, welche die Umwelt entlasten sollen, dürfen im Endeffekt nicht zu grösseren bzw. neuen Umweltbelastungen führen. Konsequenterweise ist z.B. in die Entwicklung von Akkumulatoren bereits auch deren Entsorgung miteinzubeziehen.

### **5.1.2 Vergleich des FLYERs mit Substitutionsfahrzeugen**

Interessant wird der Einsatz des FLYERs vor allem dann, wenn mit FLYER-Fahrten Fahrzeuge mit höheren Umweltbelastungen ersetzt werden können. Nachstehend werden die verschiedenen Fahrzeuge bezüglich Energieverbrauch, Emission von Luftschadstoffen und Abfällen miteinander verglichen. Für Wirtschaft und Politik sind dies wichtige Informationen für die zukünftige Förderung dieses neuen Verkehrsmittels.

#### **a) Energie**

Abbildung 15 (nächste Seite) zeigt den Primärenergieverbrauch pro Personenkilometer der in dieser Studie betrachteten Fahrzeuge. Darin enthalten sind alle Energieverbräuche - vom Abbau der Metallerze über den Betrieb bis hin zur Entsorgung.



Erwartungsgemäss ist der Energieverbrauch beim **Fahrrad** am kleinsten, gefolgt von den beiden **FLYER**-Modellen. Der Unterschied zwischen FLYER und Mofa ergibt sich durch die grosse Differenz an Betriebsenergie (vgl. dazu Abbildung 16). Das Gewicht - unter Berücksichtigung aller Ersatzakkusätze - und damit die Herstellungenergie entsprechen sich in etwa.

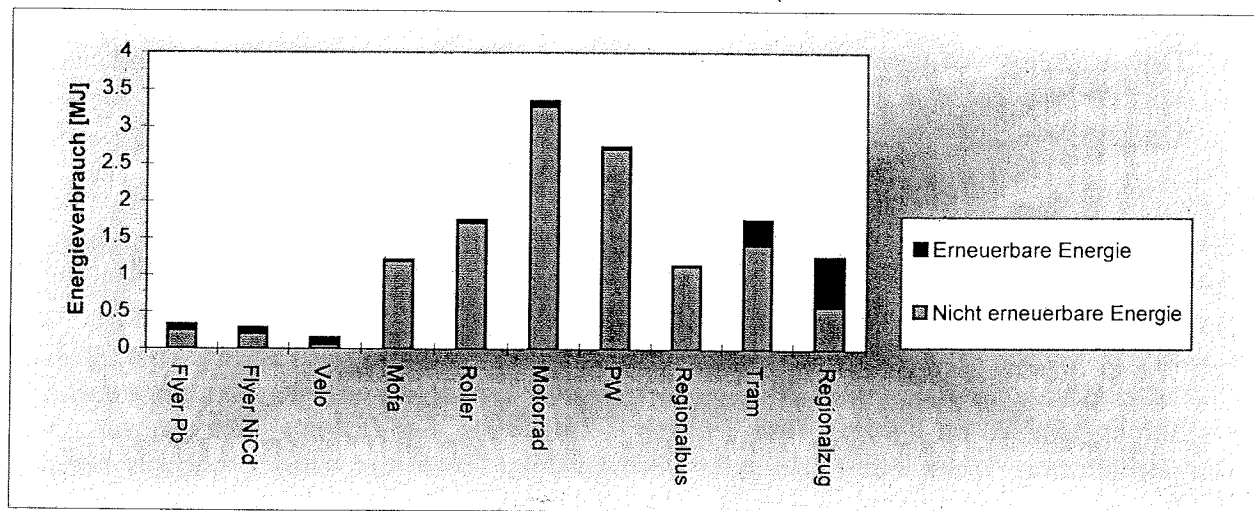


Abbildung 15: Energieverbrauch pro Personenkilometer

Vom **Mofa und Roller zum Motorrad** steigt der Energieverbrauch stark an. Grund sind der unterschiedliche Benzinverbrauch und das unterschiedliche Gewicht: Mehr Materialverbrauch bedeutet mehr Herstellungenergie. Die Möglichkeit, mit einem Motorrad während seiner Lebensdauer mehr Kilometer als mit einem Mofa bzw. einem Roller zu fahren, kann das höhere Gewicht nicht kompensieren. Zu bemerken ist, dass die Annahmen zu den Lebensfahrleistungen der verschiedenen Substitutionsfahrzeuge auf Schätzungen basieren und nicht als gesicherte Daten vorliegen (vgl. Exkurs Lebensfahrleistung).

Bei den öffentlichen Verkehrsmitteln **Regionalbus, Tram und Regionalzug** ist der Energieverbrauch durch die grössere Zahl der transportierten Personen geringer als derjenige eines Personenwagens oder eines Motorrads. Er liegt etwa im Bereich von Mofa und Roller. Bei öffentlichen Verkehrsmitteln kommt zusätzlich zu den Annahmen der Lebensfahrleistung die Schätzung der Auslastung als Unsicherheitsfaktor dazu (vgl. Exkurs Auslastung).

Der **Personenwagen** weist nach dem Motorrad den zweithöchsten Energieverbrauch pro Personenkilometer auf. Gegenüber den beiden FLYER-Modellen verbraucht der Personenwagen von der Herstellung bis zur Entsorgung rund 10-mal soviel Energie.

In Abbildung 15 ist der gesamte Energieverbrauch zusätzlich in **erneuerbare und nicht erneuerbare Energie** aufgeteilt. Die erneuerbare Energie besteht vorwiegend aus Wasserkraft. Die menschliche Energie, die beim FLYER und Fahrrad

berücksichtigt ist, wird ebenfalls als erneuerbare Energie betrachtet, obschon bei deren Bereitstellung auch nicht erneuerbare Energie verbraucht wird (z.B. Kochen mit Strom). Nicht erneuerbare Energie entsteht aus dem Verbrauch von Rohstoffen wie z.B. Erdöl und Uran.

Die Abbildung macht deutlich, dass der Anteil an erneuerbarer Energie allgemein sehr klein ist – die betrachteten Fahrzeuge sind bezüglich Energieverbrauch nicht nachhaltig. Nur bei den Fahrzeugen mit Elektroantrieb (Tram, Regionalzug und FLYER) ist der Anteil an erneuerbarer Energie grösser. Der Grund liegt darin, dass nur der Energieträger Elektrizität teilweise aus Wasserkraft erzeugt wird und somit erneuerbare Energie enthält. Dies gilt insbesondere für den Schweizer Strommix, der einen sehr grossen Anteil an Wasserkraft enthält (40,3%). Werden diese Fahrzeuge jedoch mit europäischem Strom betrieben (nur 16% Wasserkraft), ist der Anteil an erneuerbarer Energie kaum noch grösser als derjenige benzinbetriebener Fahrzeuge. Bei der Einführung von Elektrobikes als Massenprodukt trägt deshalb die umweltfreundliche Produktion des Stroms wesentlich zu einer guten Ökobilanz bei.

In Abbildung 16 wird der gesamte Energieverbrauch pro Personenkilometer betrachtet, aufgeteilt in die drei Bereiche

- **Betriebsenergie** (Energiegehalt der verbrauchten Liter Treibstoff, verbrauchte Kilowattstunden Strom)
- **Bereitstellung der Betriebsenergie** (Erdölförderung, Raffinierung, etc.)
- **Restliche Energie**, d.h. Herstellung, Unterhalt und Entsorgung der Fahrzeuge.

Wird die Betriebsenergie mit der dazu benötigten Bereitstellungsenergie verglichen fällt auf, dass das Verhältnis beim mit Diesel betriebenen Regionalbus am besten ist. Beim Dieselantrieb wird die Energie am effizientesten, mit dem kleinsten Herstellungsaufwand verwendet. Beim Benzinantrieb ist dieses Verhältnis etwas schlechter. Der Elektroantrieb (FLYER, Tram, Regionalzug) schneidet am schlechtesten ab, da die Bereitstellung des Stromes sogar mehr Energie verbraucht als zur Nutzung zur Verfügung steht. Der Wirkungsgrad ist also kleiner als 50%.

Elektromotoren haben jedoch den Vorteil, dass die Umsetzung der Elektrizität in Bewegung sehr effizient erfolgen kann, da Elektromotoren in der Regel den deutlich besseren Wirkungsgrad aufweisen als Verbrennungsmotoren (Diesel, Benzin). Beim FLYER erfolgt die Umsetzung so effizient, dass der Gesamtwirkungsgrad beim Betrieb – abgesehen vom Fahrrad – am besten ist. Um eine Person über einen Kilometer zu transportieren, muss also am wenigsten Energie (Betriebs- und Bereitstellungsenergie) eingesetzt werden.

Bezüglich Herstellung, Unterhalt und Entsorgung schneiden Regionalzug und Tram durch die hohe Lebensdauer und Auslastung am besten ab – der Energieverbrauch kann auf eine hohe Zahl Kilometer und Personen umgelegt werden.

Wird der Energieverbrauch für Betrieb und deren Bereitstellung mit dem Energieverbrauch für Herstellung, Unterhalt und Entsorgung (auch als graue Energie bezeichnet) verglichen, weist das Fahrrad vor dem FLYER das beste Ergebnis auf. Im Vergleich mit der zu investierenden grauen Energie ist der Energieverbrauch beim Betrieb verhältnismässig gering. Bei muskelkraftverstärkenden Fahrzeugen wird also

die bei der Bereitstellung sehr energieintensive Energieform Elektrizität effizienter eingesetzt als beim Tram oder Regionalzug oder anders ausgedrückt: Elektrobikes bieten eines der sinnvollsten Anwendungsgebiete von Elektroantrieben.

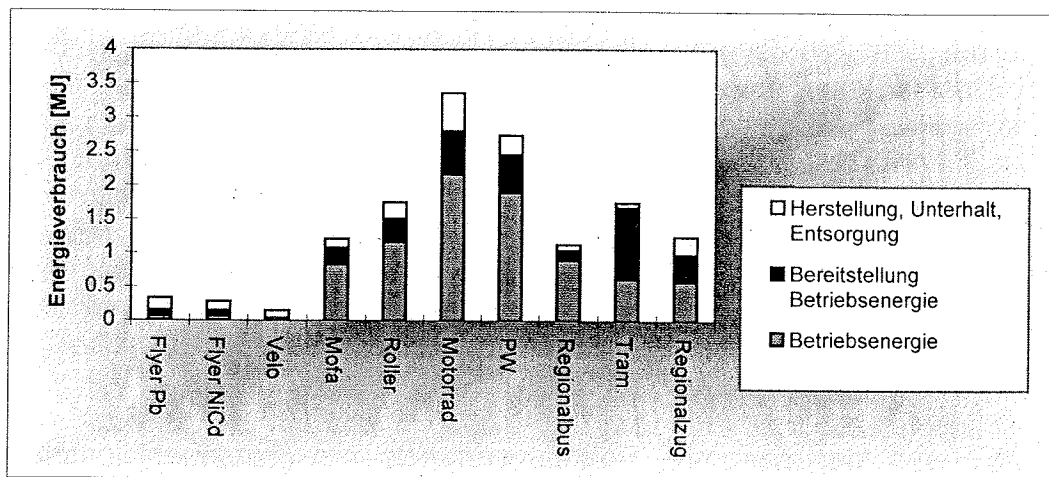


Abbildung 16: Energieverbrauch pro Personenkilometer

In Abbildung 17 wird der Energieverbrauch nicht in Megajoule betrachtet, sondern als prozentuale Darstellung.

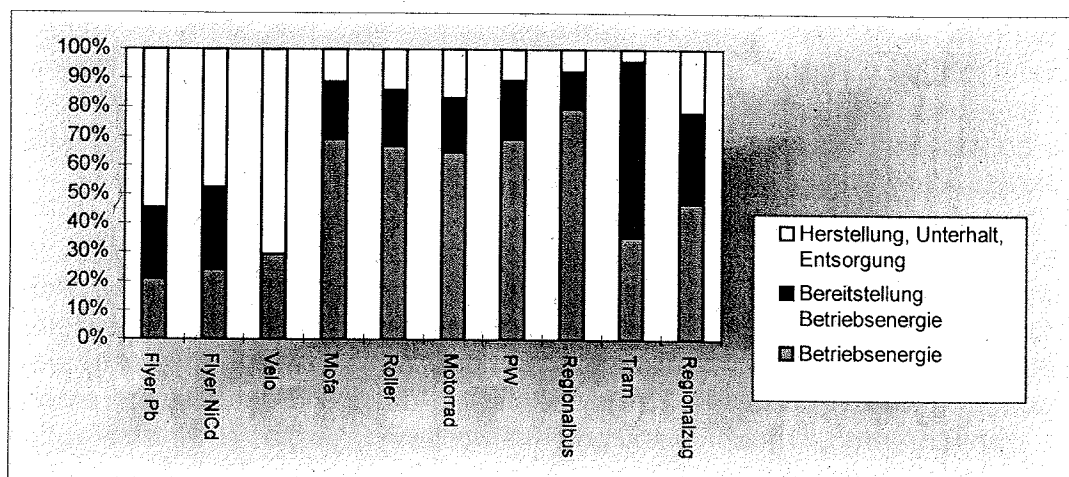


Abbildung 17: Prozentualer Anteil von Betrieb, Bereitstellung der Betriebsenergie und Herstellung, Unterhalt, Entsorgung am Energieverbrauch pro Personenkilometer

## EXKURS:

### Problemfeld Lebensfahrleistung

Als Lebensfahrleistung wird die Anzahl Kilometer bezeichnet, die mit einem Fahrzeug von seiner Herstellung bis zur Entsorgung zurückgelegt werden. Die exakte Bestimmung dieser Grösse ist äusserst schwierig, da für Fahrzeuge wie Fahrräder die genaue Anzahl der gefahrenen Kilometer kaum ermittelt werden kann. Personenwagen verfügen zwar alle über einen Kilometerzähler, mit den einzelnen Fahrzeugen werden aber äusserst unterschiedliche Distanzen zurückgelegt. Für die Fahrzeuge des öffentlichen Verkehrs liegen die ausführlichsten Daten vor, da die Zahl der Fahrzeuge geringer ist und von einer zentralen Stelle verwaltet werden.

Liegen keine Daten zu den effektiv gefahrenen Kilometern vor, kann folgender Ansatz gewählt werden: Es wird geschätzt, wie viele Kilometer ein Fahrzeug **rein technisch** maximal fahren könnte. Da ein Produkt in unserer Gesellschaft selten während der maximal möglichen Gebrauchsdauer benutzt wird, ist dieser rein technisch erreichbare Maximalwert in der Regel zu hoch angelegt. Anhand des gesamten Energieverbrauchs pro Personenkilometer von Motorrad und Personenwagen soll gezeigt werden, welchen Einfluss die Lebensfahrleistung je nach getroffener Annahme haben kann.

Abbildung 18 zeigt einerseits den Energieverbrauch pro Personenkilometer bei einer Lebensfahrleistung von 70'000 km für ein Motorrad und von 150'000 km für einen Personenwagen, wie sie in dieser Studie angewendet werden. Andererseits wird der Energieverbrauch dargestellt bei einer für beide Fahrzeuge gleichen Lebensfahrleistung von je 100'000 km. Die aus der Abbildung ersichtlichen Unterschiede zeigen, weshalb bei Ökobilanzierungen die Berücksichtigung der getroffenen Annahmen für eine Interpretation der Resultate äusserst wichtig ist: Unterschiedliche Annahmen zu den Lebensfahrleistungen führen in diesem Fall gerade zu einer gegenteiligen Aussage.

Indirekt lässt sich aus diesen Zahlen erkennen, in welchem Verhältnis die zum Betrieb benötigte Energie sich zur Energie verhält, die bei Herstellung und Entsorgung verbraucht werden: Die Annahme der Lebensfahrleistung wirkt sich nur auf den Energieverbrauch bei Herstellung und Entsorgung aus, welcher auf die gefahrenen Kilometer aufgeteilt wird.

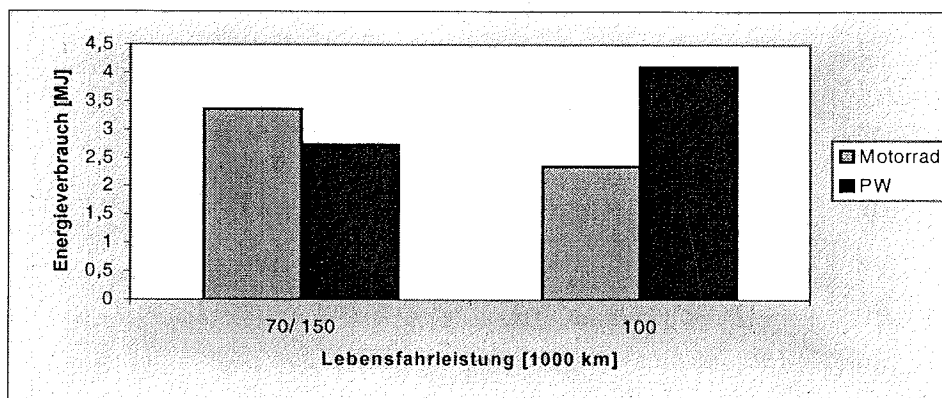


Abbildung 18: Vergleich des Energieverbrauchs **pro Personenkilometer** bei einer Lebensfahrleistung von 70'000 km (Motorrad) und 150'000 km (PW) bzw. von je 100'000 km für beide Fahrzeuge

## Problemfeld Auslastung

Mit Auslastung wird der prozentuale Anteil der von einem Fahrzeug transportierten Personen an der maximal möglichen Transportkapazität eines Fahrzeugs bezeichnet. Für die Berechnung der Umweltbelastungen pro Personenkilometer wird die Gesamtbelastung eines Fahrzeugs auf die Anzahl der mitfahrenden Personen verteilt. Bei der Schätzung der Auslastung treten vergleichbare Schwierigkeiten auf wie bei der Lebensfahrleistung beschrieben.

Anhand des gesamten Energieverbrauchs pro Personenkilometer von Roller und Personenwagen wird in Abbildung 19 der Unterschied zwischen der Annahme einer durchschnittlichen und einer maximalen Auslastung gezeigt. Als maximale Auslastung wird angenommen, dass auf dem Roller zwei und im Personenwagen fünf Personen mitfahren – im Gegensatz zu den in dieser Studie sonst verwendeten Auslastungen von 1 Person pro Roller und 1.7 Personen pro Personenwagen.

Wiederum zeigt sich ein gegensätzliches Resultat: Bei der durchschnittlichen Auslastung schneidet der Roller besser ab, bei der maximalen der Personenwagen.

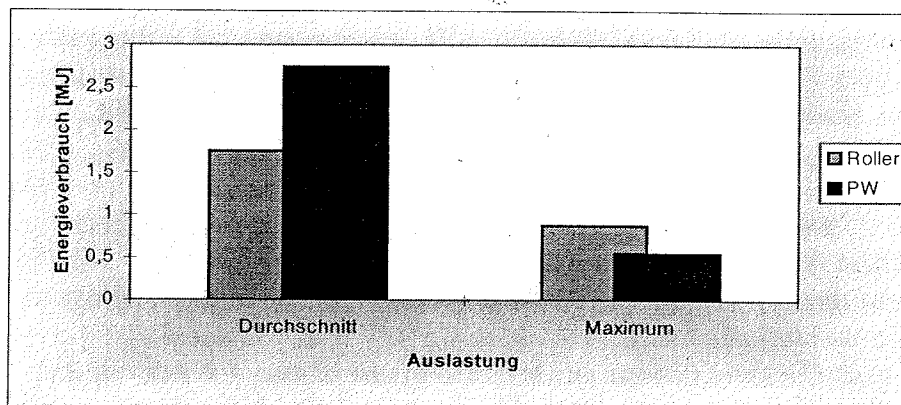


Abbildung 19: Vergleich des Energieverbrauchs **pro Personenkilometer** von Roller und PW bei durchschnittlicher und maximaler Auslastung

## b) Luftschadstoffe

In diesem Abschnitt werden die Emissionen von ausgewählten Luftschadstoffen vorgestellt. Zu jedem Schadstoff wird kurz angegeben, aus welchen Quellen er überwiegend stammt und welche Schädigungen er in der Umwelt und beim Menschen hervorruft. Die Texte wurden May 1996 entnommen. Nach der Darstellung der Resultate werden diese interpretiert.

### Kohlendioxid

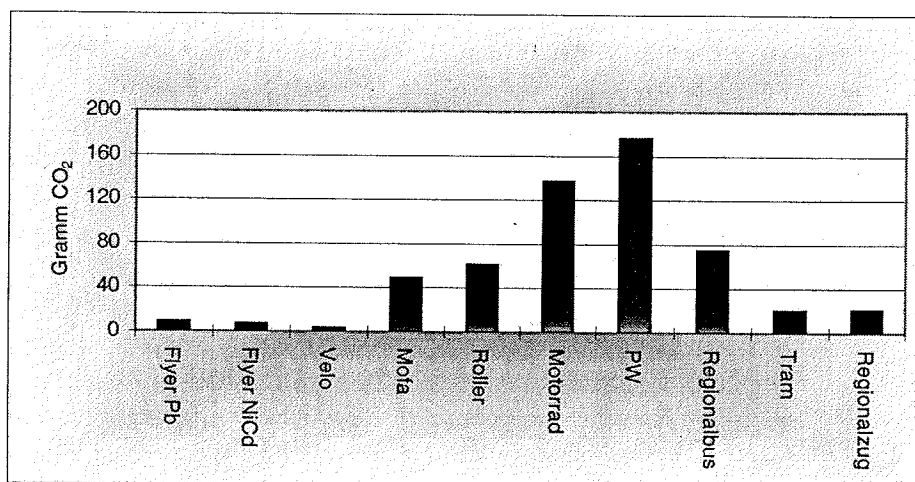


Abbildung 20: Kohlendioxidemissionen pro Personenkilometer

Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) entsteht bei der Verbrennung von fossilen Brennstoffen. Kohlendioxid ist wenig giftig - erst bei sehr hohen Konzentrationen ergeben sich narkotische Wirkungen, die bis zum Atemstillstand führen können. Kohlendioxid ist jedoch ein Treibhausgas, das in den letzten Jahren stark an Bedeutung gewonnen hat.

### Kohlenmonoxid

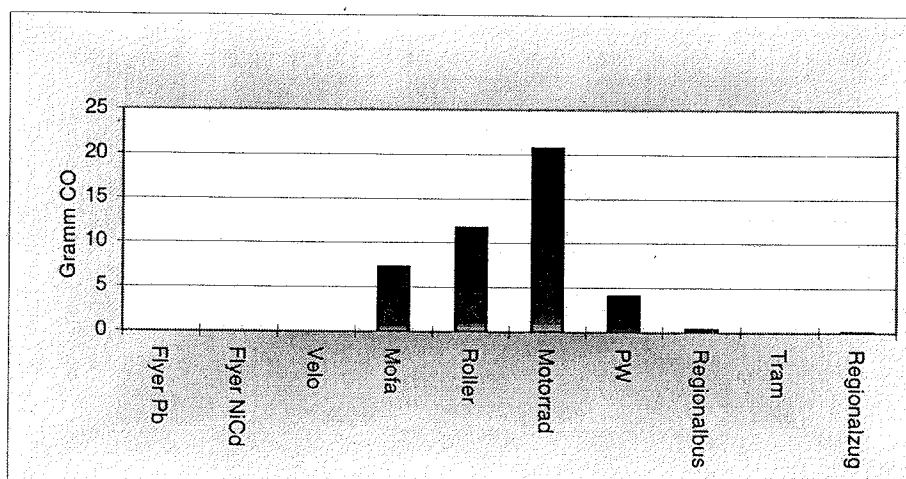


Abbildung 21: Kohlenmonoxidemissionen pro Personenkilometer

Kohlenmonoxid (CO) entsteht bei unvollständiger Verbrennung von fossilen Brennstoffen. Kohlenmonoxid ist in der Atmosphäre nur kurze Zeit stabil (es wird zu  $\text{CO}_2$  oxidiert). Es bindet sich 240 mal stärker an den roten Blutfarbstoff (Hämoglobin) als Sauerstoff und kann dadurch zu mangelnder Sauerstoffversorgung führen und schliesslich zum Tod führen.

## Lachgas

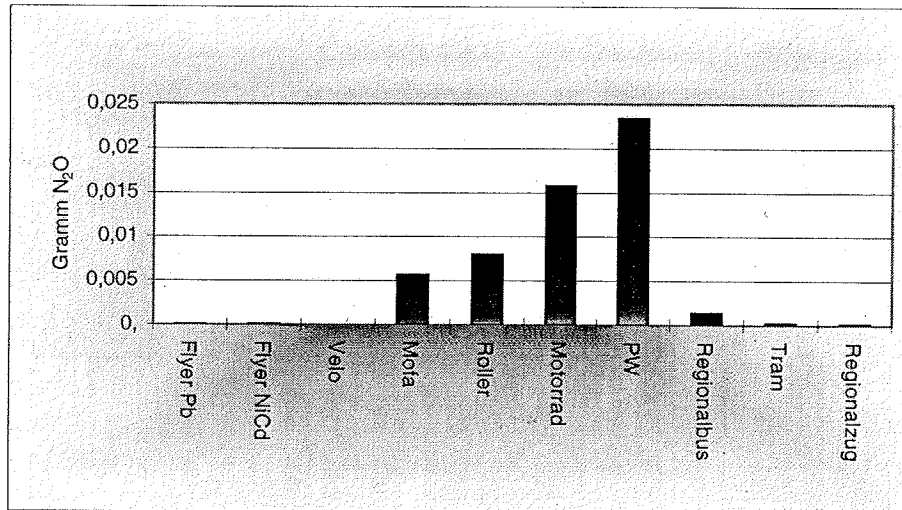


Abbildung 22: Lachgasemissionen pro Personenkilometer

Lachgas ( $\text{N}_2\text{O}$ ) entsteht durch Verbrennung fossiler Brennstoffe, bakterielle Umwandlung von Stickstoffdüngern im Boden sowie entlang von Hochspannungsfreileitern durch Ionisation der hauptsächlichen Bestandteile der Atmosphäre, nämlich Sauerstoff und Stickstoff. Die Verweilzeit in der Atmosphäre beträgt mehr als 100 Jahre. Lachgas ist ein Treibhausgas.

## Methan

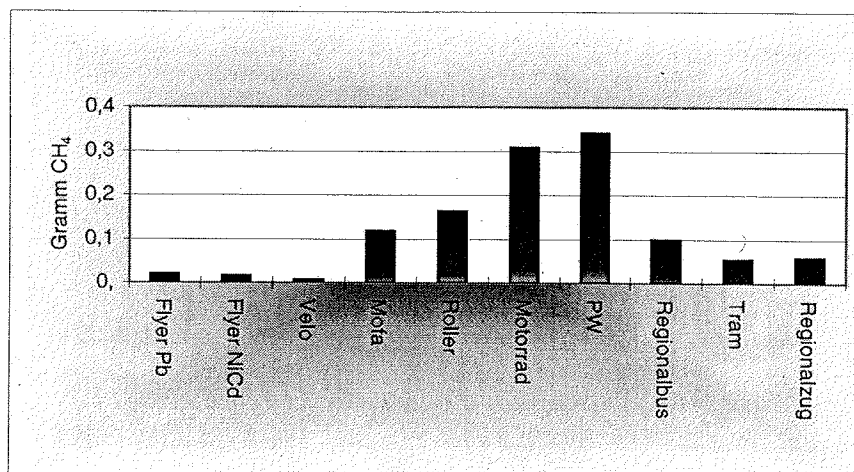


Abbildung 23: Methanemissionen pro Personenkilometer

Methan ( $\text{CH}_4$ ) ist ein Kohlenwasserstoff und Hauptbestandteil des Erdgases. Es entweicht beim Fördern von Öl und Aufarbeiten von Kohle. Grosse Mengen werden auch in den Mägen von Wiederkäuern, in Reisfeldern und Kehrdeponien freigesetzt. Methan ist ebenfalls ein Treibhausgas.

### Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe (NMVOC)

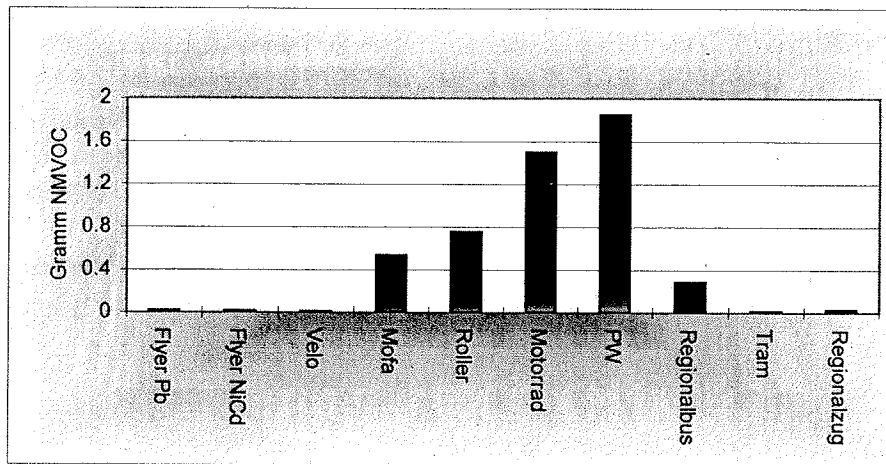


Abbildung 24: NMVOC-Emissionen pro Personenkilometer

Flüchtige Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe (NMVOC) stammen aus unvollständiger Verbrennung von fossilen Brennstoffen, aus Lecken und Verdampfungsverlusten beim Transportieren und Umfüllen von Brennstoffen sowie aus Lösungsmitteln für Farben und Lacke. Es handelt sich um eine Vielzahl von Verbindungen von Kohlenstoff (C) und Wasserstoff (H), alleine oder in Kombination mit vielen weiteren Elementen. Die Art der Verbindung ist dabei entscheidend für das Treibhauspotential und die Giftigkeit. Die NMVOC sind eine Vorstufe des photochemischen Smogs.

### Schwefeldioxid

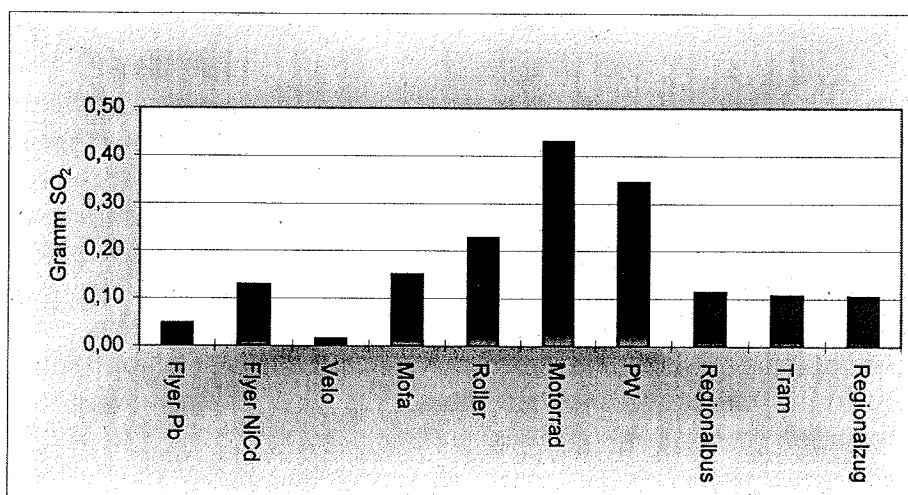


Abbildung 25: Schwefeldioxid-Emissionen pro Personenkilometer



Schwefeloxide ( $\text{SO}_x$ ) entstehen bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe. Es gibt verschiedenste Verbindungen mit Schwefel S und Sauerstoff O. Als Leitsubstanz gilt Schwefeldioxid  $\text{SO}_2$ .

$\text{SO}_2 + \text{Wasserdampf} + \text{Sonnenlicht} \rightarrow \text{Schweflige Säure } (\text{H}_2\text{SO}_3),$   
anschliessend Oxidation zu Schwefelsäure ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ )

Je länger das  $\text{SO}_2$  in der Atmosphäre verweilt, desto mehr Schwefelsäure entsteht. Hohe Schornsteine erhöhen die Verweilzeit, was einem menschlichen „Eigentor“ gleichkommt: Die Absicht, die nähere Umgebung der Emissionsquelle zu entlasten, wird zwar erreicht, aber zum Preis einer globalen Mehrbelastung. Die in der Atmosphäre gebildete Schwefelsäure gelangt mit Niederschlägen zurück auf die Erde (saurer Regen).

Schwefeldioxid hemmt die pflanzliche Photosynthese (z.B. Waldsterben, Ernteverringerung) und reizt die Schleimhäute von Lebewesen.

### **Staub/Partikel**

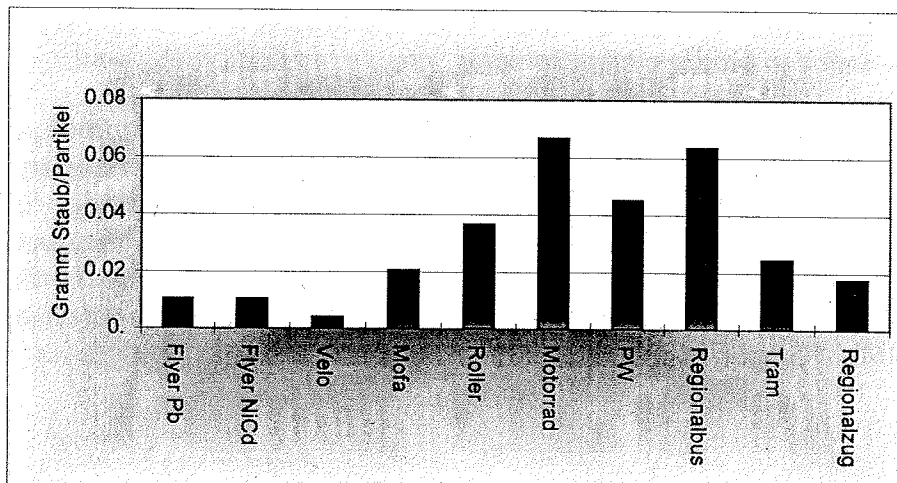


Abbildung 26: Staub/Partikel-Emissionen pro Personenkilometer

Staub und Partikel entstehen bei der Verbrennung von (in dieser Reihenfolge zunehmen) gasförmigen, flüssigen und festen fossilen Brennstoffen. Der Parameter umfasst alle Abgaben von Staub-, Russ- und Partikelemissionen (keine Unterscheidung nach Partikeldurchmesser, was ein Mass für die Lungengängigkeit wäre). Metallemissionen und starke Gifte wie z.B. Dioxine/Furane oder Polyzyklische-Aromatische-Kohlenwasserstoffe (PAK) verlassen die Verbrennungsmaschinen zum grossen Teil auf den Partikeln angehaftet.

Über die Atemluft gelangen die Partikel in Lebewesen. Mögliche Folgen sind: Störungen des Immunsystems, Veränderung des Blutbildes, Erbgutveränderungen (mutagen), Fruchtschädigungen (teratogen).

## Stickoxide

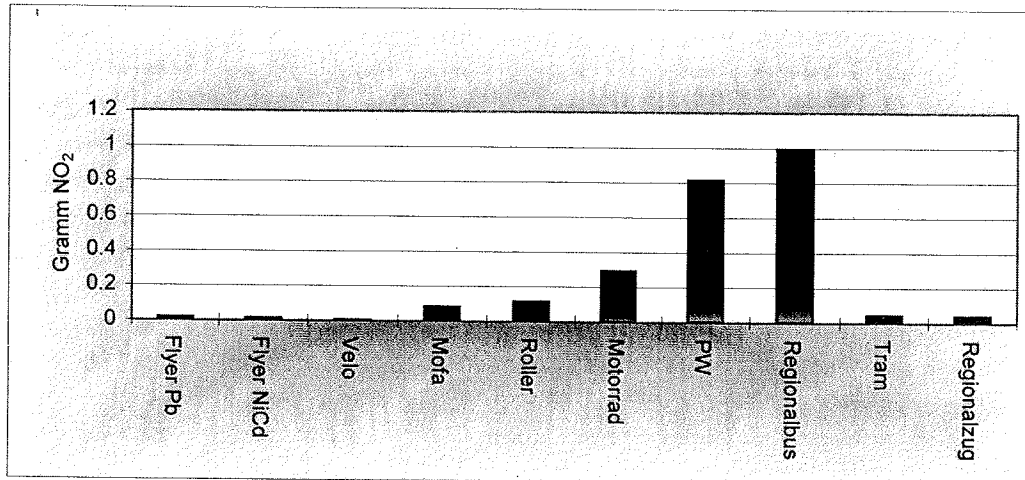


Abbildung 27: Stickoxidemissionen pro Personenkilometer

Stickoxide (NO<sub>x</sub>) entstehen bei Verbrennungsprozessen. Es gibt eine Vielzahl von Verbindungen mit Stickstoff N und Sauerstoff O, als Leitsubstanz gilt Stickstoffdioxid NO<sub>2</sub>. NO<sub>2</sub> ist eine wichtige Vorläufersubstanz zur Bildung von troposphärischem Ozon (Sommersmog). In der Atmosphäre wird Salpetersäure gebildet, die mit den Niederschlägen wieder ausgewaschen wird (saurer Regen).

$\text{NO} + \text{NO}_2 + \text{Wasserdampf} + \text{Sonnenlicht} \rightarrow \text{Salpetrige Säure (HNO}_2\text{)}$   
 Diese wird oxidiert zu Salpetersäure (HNO<sub>3</sub>).

## Interpretation der Abbildungen 20 bis 27

Werden die verschiedenen Fahrzeuge bezüglich den Luftschadstoffen Kohlendioxid, Kohlenmonoxid, Lachgas, Methan, Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe, Schwefeldioxid, Staub/Partikel und Stickstoffdioxide betrachtet, lässt sich immer dasselbe Muster erkennen: Die geringsten Emissionen hat erwartungsgemäss das **Fahrrad**. Darauf folgen die beiden **FLYER-Modelle** (FLYER Pb vor FLYER NiCd), meist dicht gefolgt von den beiden öffentlichen Verkehrsmitteln **Tram** und **Regionalzug**. Die verhältnismässig hohen, vor allem abbaubedingten Schwefeldioxid-Emissionen des FLYERs mit Nickel-Cadmium-Akkumulatoren wurde schon in Kapitel 5.2 begründet.

Fahrrad, FLYER, Tram und Regionalzug sind ausschliesslich elektrisch oder mit Muskelkraft betriebene Fahrzeuge. Es erstaunt nicht, dass die Luftemissionen dieser Fahrzeuge beim Betrieb mit Schweizer Strom bzw. dem SBB-Strommix sehr gering sind: Der Strom wird praktisch zu 100% aus Wasserkraft und atomar erzeugt. Beim Betrieb mit UCPT-Ström, der zu 43% fossil-thermisch erzeugt wird (Öl, Kohle, Gas), würden die Resultate vor allem für Tram und Regionalzug verändert. Die Resultate der beiden FLYER-Modelle würden nur gering verändert, da der Anteil an Betriebsenergie relativ klein ist (vgl. Abbildung 16).

Der **Regionalbus** als drittes betrachtetes öffentliches Verkehrsmittel liegt unter der Annahme mit Schweizer Strom meist knapp über den Werten von Tram und Regionalzug. Mit UCPT-Ström gleicht sich der Regionalbus in etwa den Werten von

Tram und Regionalzug an. Einzig im Bezug auf Stickstoffdioxide und Staub/Partikel schneidet der Regionalbus sehr schlecht ab. Dies soll jedoch mit den neuen Abgasnormen wesentlich besser werden (vgl. Maibach 1995).

Bei den Fahrzeugen **Mofa, Roller und Motorrad** nehmen die Emissionen in dieser Reihenfolge laufend zu. Das **Motorrad** hat seine Schwachstellen beim Ausstoss von Kohlenmonoxid, Schwefeldioxid und Staub/Partikel. Der **Personenwagen** erzeugt die grössten Mengen an Kohlendioxid, Lachgas, Methan und Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe. Die grösste Menge an Emissionen haben abwechselungsweise das Motorrad und der Personenwagen.

### Radioaktive Substanzen

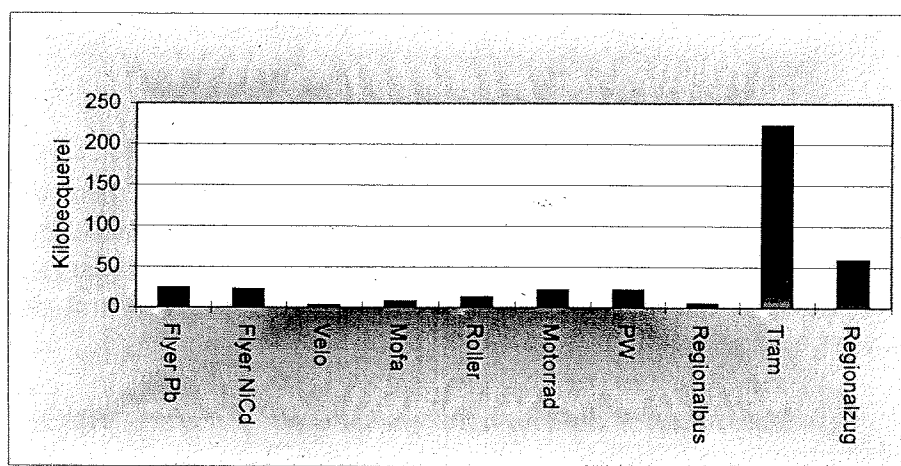


Abbildung 28: Emissionen radioaktiver Substanzen pro Personenkilometer (=pkm)

Die radioaktiven Substanzen stammen ausschliesslich aus der Stromerzeugung in Atomkraftwerken. Die Fahrzeuge mit Elektroantrieb verursachen folglich auch die höheren Emissionen. In geringeren Mengen tragen jedoch auch die anderen Fahrzeuge zur Emission radioaktiver Substanzen bei. Grund: Für die Produktion dieser Fahrzeuge wie auch für die Bereitstellung der Treibstoffe wird Strom verbraucht, der teilweise in Atomkraftwerken produziert wird.

Der Stromverbrauch des FLYERS bei Herstellung, Betrieb und Entsorgung ist mit 0.036 kWh/pkm sehr gering. Deshalb sind auch die durch den FLYER verursachten radioaktiven Substanzen mit denjenigen von Motorrad oder Personenwagen vergleichbar. Der Betrieb dieser Fahrzeuge braucht zwar direkt keinen Strom, in der Herstellung wird aber viel mehr Strom verbraucht als beim FLYER.

Bei Tram und Regionalzug wird etwa zwanzig mal mehr Energie verbraucht als beim FLYER (0.625 bzw. 0.594 kWh/pkm). Dies führt zu den hohen Emissionen an radioaktiven Substanzen beim Tram. Die Emissionen des Regionalzuges liegen etwa bei einem Drittel dessen, was erwartet werden könnte. Die Begründung liegt darin, dass die SBB einen grossen Teil ihrer Elektrizität in eigenen Wasserkraftwerken produzieren, was beim SBB-Strommix zum geringen Anteil Atomstrom von nur 12% führt. Zum Vergleich: der Schweizer Strommix hat einen Anteil von 50% Atomstrom.

### c) Abfälle

### c) Abfälle

Im Bezug auf die Abfälle können keine sinnvollen Aussagen gemacht werden. Die Annahmen, die bei den verschiedenen Quellen getroffen werden mussten, sind zu unterschiedlich und können zu erheblichen Verfälschungen führen. Beispiele sind:

- Für die Fahrzeuge Personenwagen, Regionalbus, Tram und Regionalzug wird Altöl bilanziert, das als Sondermüll entsorgt wird. Für das Motorrad jedoch wurde der Ölwechsel vernachlässigt. Das führt dazu, dass der Personenwagen 50 mal mehr Sondermüll erzeugt als das Motorrad, was nicht nachvollziehbar ist.
- Bis 90% des Abfalles bestehen aus Abraum, der beim Abbau der Metallerze anfällt. Die Angaben zu den Metallgehalten der Erze sind sehr ungenau, da grosse Unterschiede zwischen den einzelnen Lagerstätten bestehen. Die getroffenen Annahmen haben jedoch direkten Einfluss auf die Abraum- und demnach auch auf die Abfallmenge.
- In Bezug auf die Abfallentsorgung ist die Diskrepanz von Theorie und Praxis sehr gross. In den meisten Fällen ist die Überprüfung, ob die Abfälle tatsächlich so entsorgt werden, wie sie theoretisch entsorgt werden sollten, sehr schwierig. Es kann also nur ein Idealfall bilanziert werden, der stark von der Wirklichkeit abweichen kann.

Zusammenfassend lassen sich bezüglich Energie, Luftschadstoffen und Abfällen folgende Stärken und Schwächen des FLYERs im Vergleich mit Substitutionsfahrzeugen festhalten:

#### Vergleich des FLYERs und der Substitutionsfahrzeuge bezüglich:

##### a) ENERGIE

Der **gesamte Energieverbrauch** pro Personenkilometer ist beim FLYER, abgesehen vom Fahrrad, mit Abstand am geringsten. Wie bei allen Verkehrsmitteln mit Elektroantrieb ist auch beim FLYER der Anteil an **erneuerbarer**

**Energie** verhältnismässig hoch (der Schweizer Strommix enthält einen hohen Anteil Wasserkraft).

Beim FLYER wird für den **Betrieb** ein vergleichsweise geringer Anteil der Gesamtenergie verbraucht.

##### b) LUFTSCHADSTOFFE

Bezüglich allen betrachteten Luftschadstoffen erzeugt der FLYER nach dem Fahrrad die geringsten Emissionen.

Nur bei den durch den FLYER verursachten radioaktiven Substanzen wird eine verhältnismässig hohe Menge emittiert, da der Schweizer Strommix 50% Kernkraft enthält.

##### c) ABFÄLLE

Bei den Abfällen können keine sinnvollen Aussagen gemacht werden.

## 5.2 Vergleich mittels Bewertungsmethoden

### 5.2.1 Wirkungsorientierte Klassifizierung

Die Einheiten in den nachfolgenden Abbildungen sind dimensionslos (Herleitung: siehe Abschnitt 2.7.1).

#### a) Treibhauseffekt

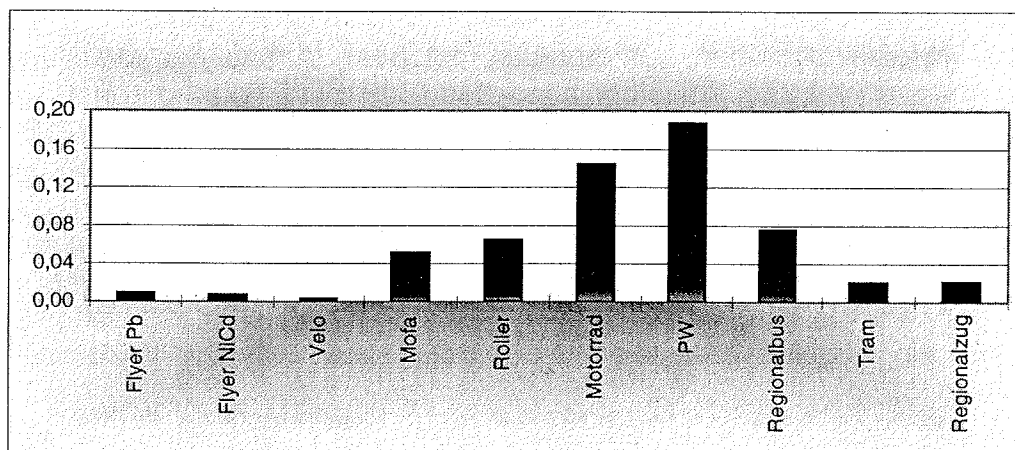


Abbildung 29: Wirkungen der einzelnen Fahrzeuge auf den Treibhauseffekt

Vergleicht man die Abbildung 29 mit den Abbildungen der Luftschadstoffe (vgl. Kapitel 5.3.2), so fällt auf, dass sich die Fahrzeuge im Bezug auf den Treibhauseffekt sehr ähnlich verhalten wie im Bezug auf Kohlendioxid. Aus Heijungs 1992 kann entnommen werden, dass Kohlendioxid bezüglich Treibhauseffekt zwar ein relativ kleines Wirkungspotential besitzt. Die Emissionen an Kohlendioxid, verglichen mit anderen Luftschadstoffen, sind jedoch sehr gross (50 mal grösser als Kohlenmonoxid). Kohlendioxid hat fast durchwegs den grössten Einfluss auf die Berechnungen des Treibhauseffekts.

Beispiel: Bei Personenwagen werden 180 g CO<sub>2</sub> und 0.025 g N<sub>2</sub>O pro Personenkilometer emittiert, was einem Faktor von 7'200 entspricht.

Die sehr stark wirksamen Treibhausgase wie die halogenierten Kohlenwasserstoffe haben hier nur wenig Einfluss, da sie bei den beschriebenen Fahrzeugen kaum emittiert werden.

#### b) Überdüngung

Für die Überdüngung sind vor allem Wasserschadstoffe, allen voran Phosphat, verantwortlich. In dieser Bilanzierung kann aufgrund fehlender Daten ihre Bedeutung nicht zufriedenstellend abgeschätzt werden. Die Ergebnisse in Abbildung 30 sollten deshalb nicht überbewertet werden. Die Ergebnisse sind stark durch die Stickstoffemissionen geprägt, die bei den Luftemissionen das grösste Wirkungspotential haben. Dies erklärt den hohen Wert des Regionalbusses.

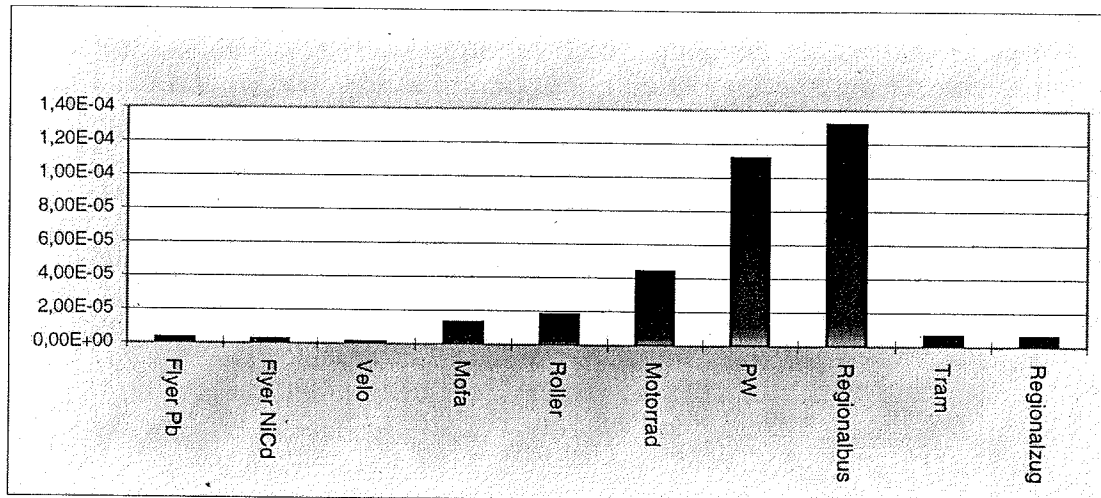


Abbildung 30: Wirkungen der einzelnen Fahrzeuge auf die Überdüngung

### c) Versauerung

Die Versauerung wird vorwiegend durch die Luftschadstoffe Schwefeldioxid und Stickstoffdioxid erzeugt. Nicht überraschend sind die hohen Werte für Roller, Motorrad und Personenwagen. Der Regionalbus (hoher Anteil  $\text{NO}_x$ ) und der FLYER mit NiCd-Akkumulatoren (hoher Anteil  $\text{SO}_2$ ) weisen verhältnismässig hohe Werte auf.

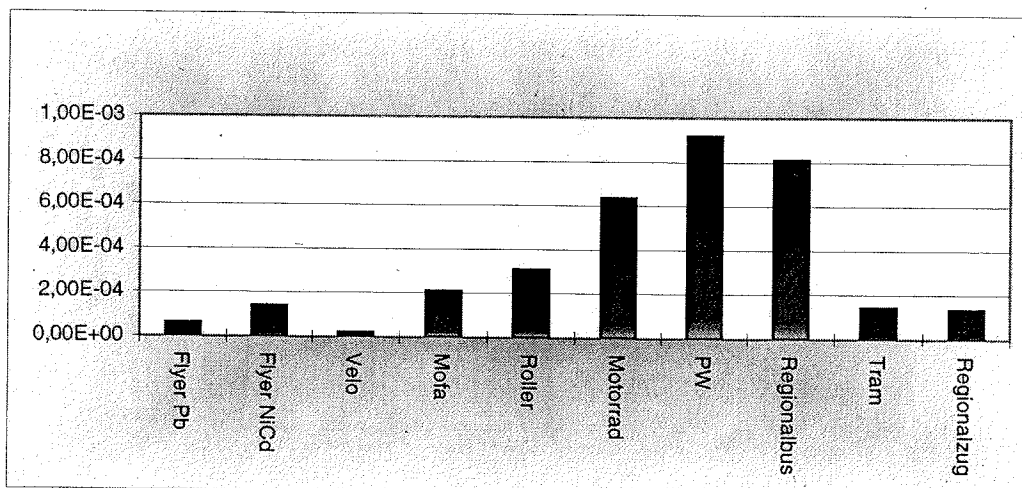


Abbildung 31: Wirkungen der einzelnen Fahrzeuge auf die Versauerung

**d) Ozonabbau**

in der Stratosphäre erfolgt vorwiegend durch halogenierte Kohlenwasserstoffe, die von den betrachteten Fahrzeugen jedoch nur in geringen Mengen emittiert werden.

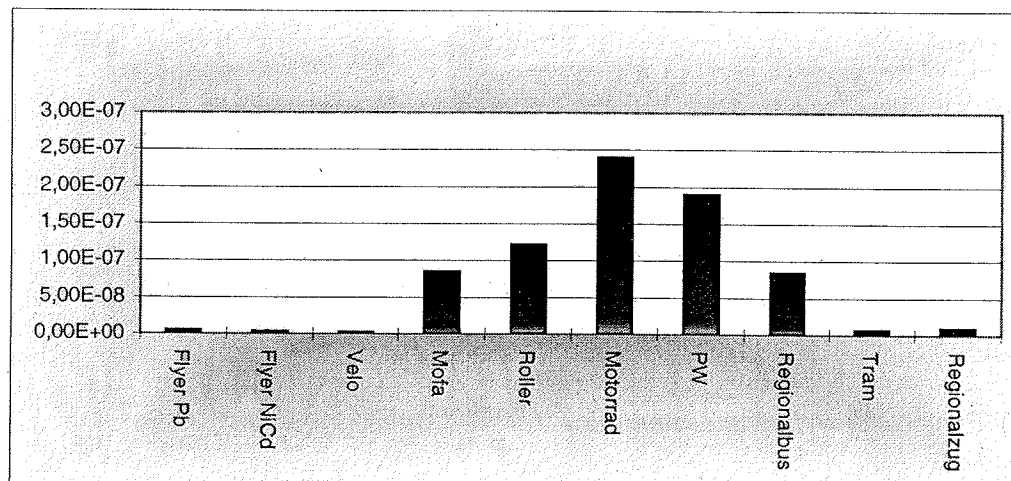


Abbildung 32: Wirkungen der einzelnen Fahrzeuge auf den Ozonabbau

**e) Smogbildung**

Smog wird vorwiegend durch Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe (NMVOC), aromatische und halogenierte Kohlenwasserstoffe verursacht. Die Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe machen bei den betrachteten Fahrzeugen den grössten Anteil aus. Entsprechend gross sind die Ähnlichkeiten zwischen Abbildung 33 und der Abbildung der NMVOC-Emissionen in Abbildung 24. Roller, Motorrad und Personenwagen tragen wiederum am meisten zur Smogbildung bei.

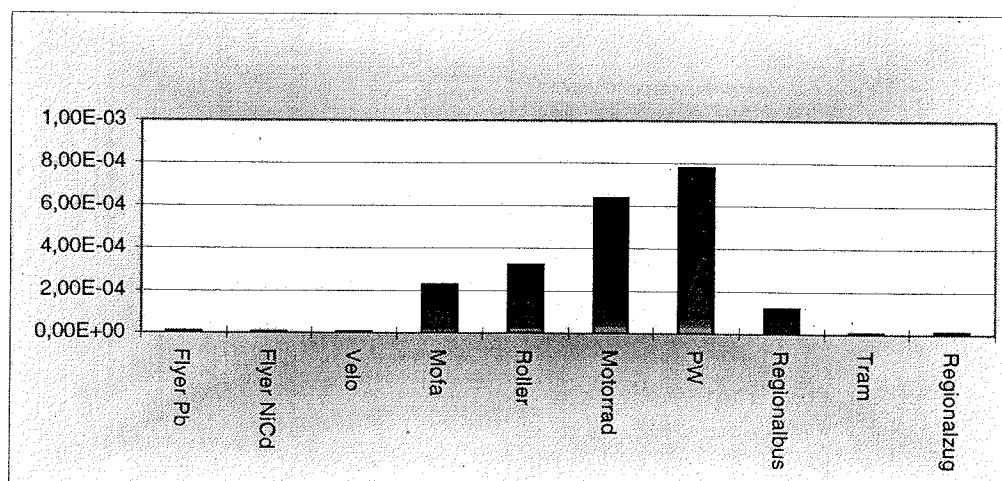


Abbildung 33: Wirkungen der einzelnen Fahrzeuge auf die Smogbildung

## f) Ökotoxizität

Zur Ökotoxizität tragen vorwiegend Wasserschadstoffe bei. Dabei hat Cadmium eines der grössten Wirkungspotentiale. Aufgrund fehlender Daten sind in dieser Bilanzierung keine Cadmium-Emissionen ins Wasser berücksichtigt. Bei der Produktion und bei unsachgemässer Entsorgung von Nickel-Cadmium-Akkumulatoren kann aber durchaus Cadmium ins Wasser gelangen. Das Entsorgungskonzept der NiCd-Akkumulatoren trägt also entscheidend zur Beurteilung der Ökotoxizität des FLYER NiCd bei.

## g) Humantoxizität

Zur Humantoxizität tragen vorwiegend Luftemissionen von Blei, Nickel, Cadmium und anderen Metallen bei. Damit lassen sich auch die im Vergleich zu den anderen Fahrzeugen eher hohen Werte der beiden FLYER-Modelle erklären.

Da auch hier kaum Daten vorliegen, wird analog zur Ökotoxizität auf die Darstellung der Resultate verzichtet. Die Humantoxizität wird analog zur Ökotoxizität stark durch das gewählte Entsorgungsverfahren bestimmt.

**Zusammenfassend** lässt sich folgendes festhalten: Für den Vergleich der beiden FLYER-Modelle liefert die Bewertungsmethode der wirkungsorientierten Klassifizierung Erkenntnisse im Bereich der Toxizität. Bei wesentlich verbesserter Datenlage und bei einem definierten Entsorgungskonzept dürfte dieser Bereich massgebend für den Entscheid zwischen Blei- und NiCd-Akkumulatoren werden. Die umweltgerechte Produktion und vor allem die Entsorgung der Akkumulatoren ist für die Bilanz des FLYERs entscheidend.

Die Differenz der beiden FLYER-Modelle bezüglich der Versauerung lässt sich analog zur Differenz bei Schwefeldioxydausstoss in Kapitel 5.1.2 erklären. Sonst lassen sich kaum Unterschiede zwischen den beiden Modellen erkennen.

Beim Vergleich aller Fahrzeuge zeigt sich in etwa immer wieder dasselbe Muster: Das Fahrrad hat jeweils die niedrigsten Werte, gefolgt von den beiden FLYER-Modellen. Etwas höhere Werte haben die öffentlichen Verkehrsmittel, wo meist der Regionalbus maximale Werte aufweist. Nach dem Mofa und dem Roller erreichen entweder der Personenwagen oder das Motorrad die höchsten Werte. Die meisten Unterschiede sind auf die Emission von Luftschadstoffen zurückzuführen (vgl. Kapitel 5.2.2).



## 5.2.2 Immissionsgrenzwertmethode

### a) Luft

Die wichtigsten luftbelastenden Prozesse sind Verbrennungsprozesse - die Luftbelastung spielt deshalb bei der Bilanzierung von Fahrzeugen eine zentrale Rolle. Beispiele für Verbrennungsprozesse sind der Antrieb mit einem Verbrennungsmotor oder die Bereitstellung von Elektrizität in Kohlekraftwerken. Interessant für die Beurteilung von Luftschadstoffen sind vor allem Stoffe, die

- in grossen Mengen emittiert werden und
- strenge Grenzwerte aufweisen, d.h. Substanzen, die in geringen Mengen ein grosses Gefährdungspotential aufweisen – wie z.B. Stickstoffoxide und Schwefeloxide.

Diese beiden Schadstoffgruppen sind für knapp 90% der belasteten Luftmenge verantwortlich. Deshalb erstaunt es nicht, dass die Abbildung 34 einer Kombination der Abbildungen 27 (Stickstoffdioxid) und 25 (Schwefeldioxid) entspricht. Der stark Schwefeldioxid emittierende Nickelabbau erklärt wiederum die grössere Belastung durch den FLYER NiCd im Vergleich zum FLYER Pb.

Beim Regionalbus entsteht das kritisch belastete Luftvolumen vor allem durch die hohen Stickstoffdioxidemissionen.

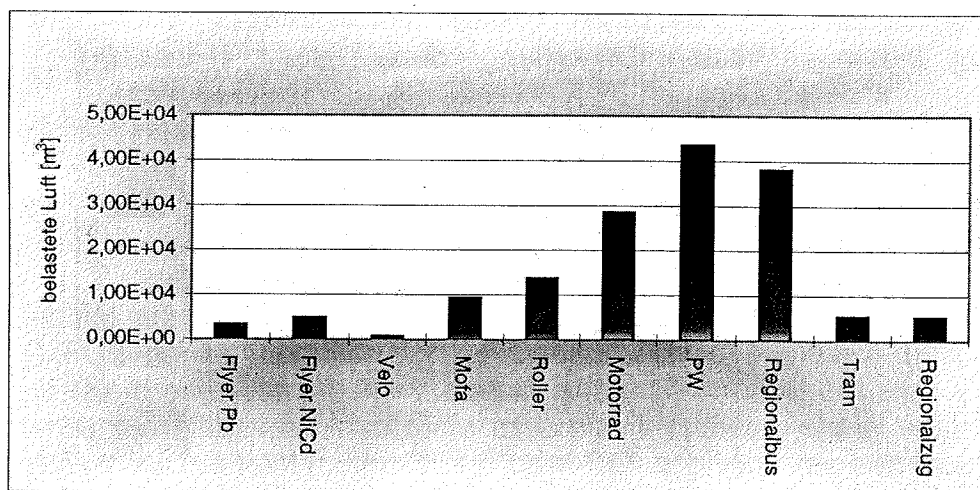


Abbildung 34: Kritisch belastetes Luftvolumen pro Personenkilometer

### b) Wasser

Im Bereich Verkehr sind Wasserbelastungen im Vergleich zu Luftbelastungen von deutlich untergeordneter Wichtigkeit. So stammen praktisch alle Wasserbelastungen, ausser denjenigen bei der Herstellung und Entsorgung von Akkumulatoren, aus vorgelagerten Prozessen wie der Bereitstellung von Ressourcen oder Energieträgern.

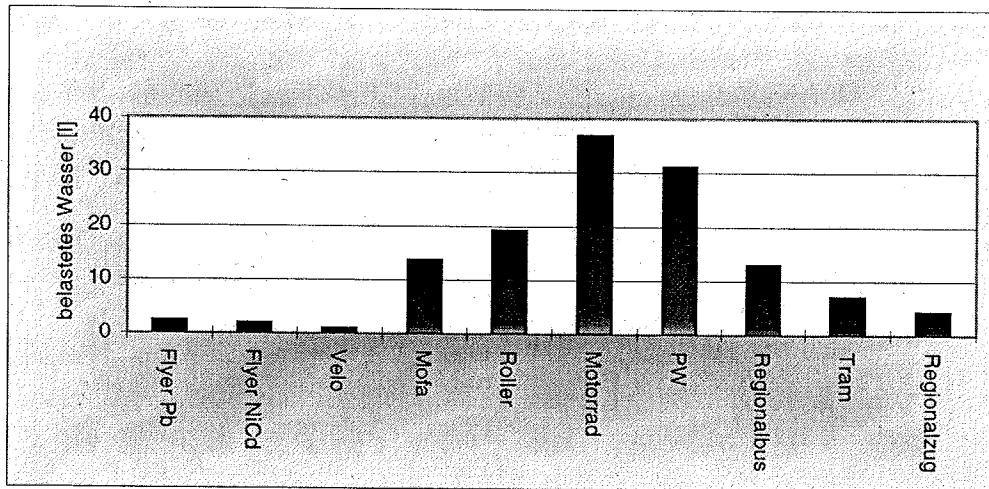


Abbildung 35: Kritisch belastetes Wasservolumen pro Personenkilometer

### 5.2.3 Methode der ökologischen Knappheit

Abbildung 36 zeigt die Bewertung der Fahrzeuge mit der Stoffflussmethode. Sie erlaubt das Zusammenfassen aller Umweltbelastungen zu einem einzigen Wert.

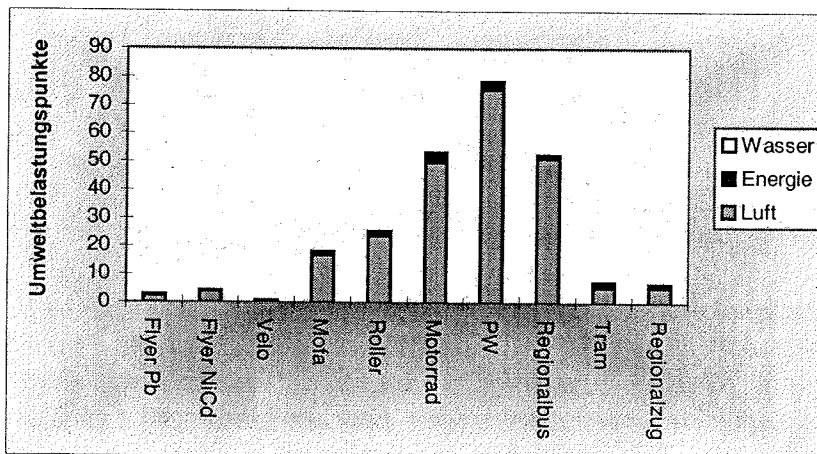


Abbildung 36: Umweltbelastungspunkte der einzelnen Fahrzeuge

Es wird bestätigt, dass die Luftbelastung zwischen hundert und tausendmal grösser ist als die Wasserbelastung, deren Anteil in Abbildung 36 nicht mehr erkennbar ist. Dem Energieverbrauch ist rund ein Zehntel der Umweltbelastungspunkte zuzuschreiben.

Werden die verschiedenen Fahrzeuge verglichen, zeigt sich wiederum das gewohnte Bild bzw. die gewohnte Reihenfolge. Am besten schneidet das Fahrrad ab, gefolgt vom FLYER Pb und dem FLYER NiCd. Der FLYER NiCd weist durch die grossen Schwefeldioxid-Emissionen beim Nickelabbau mehr Umweltbelastungspunkte auf als

der FLYER Pb. Mit geringem Abstand folgen Tram und Regionalzug mit fast vergleichbaren Werten. In der Reihe Mofa, Roller, Motorrad und Personenwagen nehmen die Umweltbelastungspunkte exponentiell zu. Dem Regionalbus werden praktisch gleich viele Umweltbelastungspunkte wie dem Motorrad zugeschrieben. Dies erklärt sich dadurch, dass Stickstoffdioxid einen hohen Ökofaktor hat.

Mit den drei verschiedenen Bewertungsmethoden lassen sich folgende Schlüsse ziehen:

Für die Ökobilanz der beiden FLYER-Modelle ist die umweltgerechte Produktion und Entsorgung der Akkumulatoren ein entscheidender Faktor.

Mit dem heutigen Stand der Ladegeräte - die bei NiCd-Akkumulatoren nicht 800 bis 1'000 Zyklen garantieren - ist der FLYER Pb dem FLYER NiCd vorzuziehen.

Die Methode der ökologischen Knappheit zeigt, dass die Luftbelastung mit Abstand zu den meisten Umweltbelastungspunkten führt. Der Energieverbrauch hat einen Anteil von rund 10% an den Umweltbelastungspunkten, die Wasserbelastung ist hundert- bis tausendmal geringer als die Luftbelastung.

Die beiden FLYER-Modelle verursachen gegenüber allen anderen Fahrzeugen – ausgenommen das Fahrrad - bedeutend weniger Umweltbelastungen.

### 5.3 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die beiden FLYER-Modelle (FLYER Pb und FLYER NiCd) im Vergleich zu den Substitutionsfahrzeugen bei allen Betrachtungsweisen sehr gute Werte aufweisen. Nur das Fahrrad belastet erwartungsgemäss die Umwelt in allen Bereichen weniger. Es darf also nicht das Ziel sein, mit dem FLYER hauptsächlich Fahrradfahrten zu ersetzen. Der Ersatz aller sonst in dieser Studie bilanzierten Fahrzeuge durch den FLYER ist jedoch sinnvoll und führt zu einer Umweltentlastung.

Primär sollten Individualverkehrsmittel wie Personenwagen, Motorrad, Roller und Mofa mit dem FLYER ersetzt werden. Der Ersatz von öffentlichen Verkehrsmitteln ist erst sekundär anzustreben, da in einigen Bereichen der Ersatz von Tram und Regionalzug durch den FLYER nur geringe Umweltentlastungen bringt. Bereits heute wird erfreulicherweise der FLYER tendenziell klar in diesem Sinne eingesetzt.

**FAZIT 1:**

**Werden ökologische Kriterien betrachtet, ist der FLYER ausser gegenüber dem Fahrrad als Ersatz für sämtliche Fahrzeuge geeignet.**

**Gegenüber dem Mofa, Roller, Motorrad und Personenwagen weist der FLYER eine wesentlich bessere Ökobilanz auf, gegenüber dem Tram und Regionalzug eine leicht bessere. Einzig das Fahrrad weist bessere Werte auf als der FLYER.**

Aufgrund der bisherigen Analyse können als **Schwachpunkte des FLYERs** jene Bereiche betrachtet werden, in welchen die Umweltbelastungen durch den FLYER den Umweltbelastungen durch Tram und Regionalzug in etwa entsprechen oder sich nur wenig von den anderen Fahrzeugen unterscheiden. Folgende Verbesserungspotentiale sind denkbar:

- **Schwefeldioxid:** Die hohen Schwefeldioxid-Emissionen beim Nickelabbau bewirken, dass der FLYER NiCd ein grosses Versauerungspotential hat, viel Luft bis an den Grenzwert verschmutzt und folglich mit mehr Umweltbelastungspunkten belastet wird. Verbesserungsmöglichkeiten liegen primär in neueren Verhüttungsverfahren, die das Schwefeldioxid zu Schwefelsäure verarbeiten und nicht in die Luft entlassen. Auf diese Entwicklungen hat die Firma BKTech direkt keinen Einfluss. Indirekt können bessere Werte über den effizienten und sparsamen Verbrauch von Nickel erreicht werden. Als Ziel ist eine möglichst lange Lebensdauer der NiCd-Akkumulatoren anzustreben. Dies setzt den Einsatz eines optimalen Ladeverfahrens voraus. Nicht zu vergessen ist, dass beim Abbau anderer Metalle aus sulfidischen Erzen ebenfalls erhebliche Schwefeldioxid-Emissionen entstehen, die in dieser Studie nicht berücksichtigt werden.
- **Radioaktive Substanzen:** Die Emissionen radioaktiver Substanzen stammen ausschliesslich aus der Stromproduktion in Atomkraftwerken. Der Lösungsansatz ist damit gegeben: geringerer Einsatz oder Verzicht auf den Verbrauch von Atomstrom. Als Ersatz sind vor allem die vermehrte Verwendung von solar oder mit Windkraft produziertem Strom zu prüfen (vgl. Kapitel 5.6 Szenario Solarstrom).
- **Die Öko- und Humantoxizität,** die beide wegen mangelnder Datenbasis kaum in ihrem effektiven Ausmass erfasst werden konnten, sind nur durch sparsamen und verantwortungsvollen Umgang mit Blei beziehungsweise Nickel und Cadmium zu vermindern. Wichtig ist hier nicht nur ein optimales Ladungsverfahren, welches eine lange Lebensdauer der Akkumulatoren und somit einen geringen Verbrauch der heiklen Metalle ermöglicht. Grosse Bedeutung kommt vor allem einer geregelten und ökologisch optimalen Entsorgung zu.

- **Der Verbrauch an nicht erneuerbaren Ressourcen** besteht beim FLYER zu einem grossen Teil aus dem Verbrauch von Blei bzw. Nickel und Cadmium für die Herstellung der Akkumulatoren. Die Verlängerung der Lebensdauer der Akkumulatoren ist wiederum das zentrale Element zur Verbesserung der heutigen Situation. Ein weiteres Verbesserungspotential liegt im optimalen Recycling dieser Metalle: Die zur Verfügung stehenden Recyclingmetalle sollten auch tatsächlich wieder zu Akkumulatoren verarbeitet werden.

**FAZIT 2:**

**Ökologische Verbesserungspotentiale liegen für BKTech vor allem in der Optimierung der Lebensdauer der eingesetzten Akkumulatoren bzw. in der Entwicklung effizienter Akkumanagementsysteme – unabhängig davon, ob Blei- oder NiCd-Akkumulatoren verwendet werden.**

**Auf Faktoren wie z.B. die Entwicklung neuer Recyclingverfahren oder den vermehrten Einsatz von Solar- und Windkraftanlagen hat BKTech nur indirekten Einfluss.**

**Der Vergleich der beiden FLYER-Modelle** lässt sich hier nicht abschliessend behandeln, da die wichtigsten Unterschiede nicht auf gesicherten Daten basieren. Die wesentlichen Aspekte und Datenlücken können folgendermassen zusammengefasst werden:

- **Beim Nickelabbau** führen die hohen Emissionen an Schwefeldioxid zu Versauerung und Luftverschmutzung. Der FLYER mit Nickel-Cadmium-Akkumulatoren erhält insgesamt mehr Umweltbelastungspunkte als der FLYER mit Bleiakkumulatoren: der FLYER Pb ist dem FLYER NiCd vorzuziehen. Es ist jedoch zu vermuten, dass der Abbau von Blei ebenfalls erhebliche Mengen an Schwefeldioxid emittiert, die in dieser Studie mangels Daten nicht bilanziert sind. In Wirklichkeit dürfte der Unterschied in der Schwefeldioxidemissionsmenge deutlich geringer sein. Die erheblichen Datenlücken beim Bergbau erlauben also keine definitiven Schlussfolgerungen.
- **Die Emissionen von Blei, Nickel und Cadmium**, die wesentlich zur Human- und Ökotoxizität beitragen, sind nur sehr lückenhaft erfasst. So konnten beispielsweise keine Werte zu den Emissionen der Entsorgung von Nickel-Cadmium-Akkumulatoren gefunden werden. Die Folgen einer nicht ordnungsgemässen Entsorgung von Akkumulatoren sind ebenfalls nicht bekannt. Nickel und vor allem Cadmium werden als vier bis hundert mal giftiger eingestuft als Blei, doch leisten Nickel-Cadmium-Akkumulatoren pro Kilogramm etwa das siebenfache von Bleiakkumulatoren (vgl. Heijungs 1992 oder BUWAL 1991). Die Datenlücke zur Akkumulatorenherstellung und deren Entsorgung erstaunt, könnten doch verschiedenste Interessenvertreter aus diesen Informationen Nutzen ziehen. In diesem Bereich muss mehr Transparenz geschaffen werden.



- **Die Unterschiede** bezüglich Energieverbrauch, Abfällen und Verbrauch nicht erneuerbarer Rohstoffe sind darauf zurückzuführen, dass die Nickel-Cadmium-Akkumulatoren pro Kilogramm mehr leisten als die Bleiakkumulatoren. Für eine Interpretation ist zu beachten, dass der Energieverbrauch für die Herstellung pauschal pro Kilogramm geschätzt wird, für die Entsorgung nur Daten für die Bleiakkumulatoren vorhanden sind und die Abfälle hauptsächlich aus Abraum bestehen, dessen Menge sehr schwierig zu schätzen ist. Zudem hängt der Verbrauch nicht erneuerbarer Rohstoffe stark davon ab, wieviel Recyclingmetall verwendet wird.
- **Bei der Betrachtung** eines Akkusatzes schneidet bezüglich der Umweltbelastungen der FLYER Pb besser ab, bei der Betrachtung der gesamten Lebensdauer der FLYER NiCd (unter der Voraussetzung eines optimierten Akkumanagements).
- **Aufgrund der Methode** der ökologischen Knappheit liegt das grösste ökologische Verbesserungspotential für alle Fahrzeuge in der Reduktion von Luftemissionen und damit indirekt in der Reduktion des Energieverbrauchs. Dies hat für die verschiedenen Fahrzeuge unterschiedliche Konsequenzen: für die Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren bedeutet dies primär Optimierung der Verbrennung (direkt z.B. über sparsamere und effizientere Motoren, indirekt z.B. über Leistungsreduktion und Verwendung von Leichtbauelementen).

Für die Fahrzeuge mit Elektroantrieb bedeutet dies primär Reduktion des Verbrauchs an fossil-thermisch und atomar erzeugtem Strom. Dieser Strom sollte nicht primär durch Strom aus Wasserkraftwerken ersetzt werden, da die forcierte Erstellung von Stauseen Schädigungen von Flora und Fauna zur Folge hat – was in einer Ökobilanz nur bedingt oder gar nicht berücksichtigt werden kann. Als Lösungsvorschlag bleibt die Substitution z.B. durch Solar- oder Windstrom. Nebst der Substitution des Energieträgers hat die ständige Reduktion des Energieverbrauchs von Produkten und Prozessen oberstes Ziel zu sein: Energieeffiziente Systeme reduzieren automatisch auch die Luftemissionen.

### **FAZIT 3:**

**Nach heutigem Stand der Technik, den verfügbaren Informationen und den in dieser Studie getroffenen Annahmen ist der FLYER Pb dem FLYER NiCd vorzuziehen. Dies ändert sich, sobald ein effizientes Akku-Managementsystem für NiCd-Akkus angeboten und die Lebensdauer der NiCd-Akkus damit entscheidend erhöht werden kann.**

**Aufgrund der Methode der ökologischen Knappheit liegt das grösste ökologische Verbesserungspotential für alle Fahrzeuge in der Reduktion der Luftemissionen. Eine Verringerung der Luftemissionen bewirkt indirekt einen geringeren Energieverbrauch.**

**Es bestehen wesentliche Datenlücken, die bei der Interpretation der Resultate von Bilanzierungen stets zu berücksichtigen sind.**

## 5.4 Szenario Solarstrom

Die Auswertung hat gezeigt, dass ein Schwachpunkt des FLYERs die aus der Stromproduktion stammenden Emissionen an radioaktiven Substanzen darstellen. Im Hinblick auf die sich abzeichnende grössere Verbreitung von Elektrofahrrädern kommt der „sauberen“ Stromproduktion grosse Bedeutung zu.

Am Beispiel des FLYERs wird mit dem Szenario Solarstrom gezeigt, welche Veränderung die Verwendung von solar produziertem Strom ergibt. Die Bilanzierungen gelten für die Schweiz, es wird also nur vom Schweizer Strommix und nicht vom UCPTE Strommix ausgegangen.

Für die Bilanzierung des FLYER-Betriebs werden anstelle des Schweizer Strommix die Daten für Solarstrom verrechnet. Selbstverständlich sind auch bei der Verwendung von Solarstrom die Umweltbelastungen nicht gleich null – auch eine Solaranlage muss zuerst produziert und installiert werden. Dies wird mit dem Anteil an grauer Energie berücksichtigt (vgl. May 1996).

Mit den aus May 1996 entnommenen Schätzungen wird für die Berechnungen davon ausgegangen, dass rund zwei Drittel des Solarstromes wirklich aus Sonnenenergie stammen und das restliche Drittel aus grauer Energie. Die Betriebsenergie des FLYERs wird also noch zu einem Drittel umweltbelastend bereitgestellt. Die Zusammensetzung der Energieträger bei der Herstellung von Solaranlagen unterscheidet sich laut May 1996 wesentlich von derjenigen für die Bereitstellung des Schweizer Stromes (vgl. Tabelle 12).

	fossil-thermisch	Nuklear	Wasserkraft
Schweizer Strommix	10%	45%	44%
Herstellung Solaranlage	46%	51%	3%

*Tabelle 12: Anteile an Energieträgern des Schweizer Strommixes und bei der Herstellung von Solaranlagen (Stromtausch Ausland nicht berücksichtigt)*

Zwar muss nur ein Drittel der Betriebsenergie des FLYERs umweltbelastend bereitgestellt werden, dafür aber mit einem mehr als viermal so grossen Anteil an fossil-thermischen Energieträgern wie Kohle, Öl und Gas. Folglich sind im Szenario Solarstrom die Luftemissionen, die beim Verbrennen der genannten Energieträger entstehen (z.B. Kohlendioxid, Schwefeldioxid, etc.), höher als beim Betrieb des FLYERs mit dem Schweizer Strommix. Der gewünschte Effekt der Reduktion der Emission radioaktiver Stoffe wird in der Gesamtbilanz jedoch erreicht (vgl. Abbildung 37).

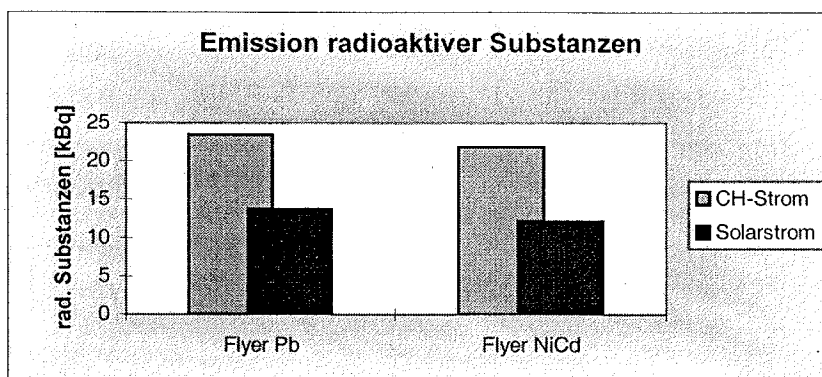


Abbildung 37: Vergleich der Emissionen radioaktiver Substanzen pro Personenkilometer beim Betrieb des FLYERs mit Schweizer Strom und Solarstrom

Da bei allen in Kapitel 5.3 verwendeten Bewertungsmethoden die radioaktiven Substanzen nicht beachtet werden, schneidet der mit Solarstrom betriebene FLYER bezüglich der betrachteten Faktoren wie Treibhauseffekt, Überdüngung, Versauerung, Luft, Wasser, etc. durchwegs etwas schlechter ab als der mit dem Schweizer Strommix betriebene. Es bleibt persönliche Ermessensfrage, ob die Reduktion der radioaktiven Emissionen um knappe 50% höher zu gewichten ist als z.B. die Erhöhung der luft- und wasserbelastenden Substanzen um etwa 10%. Unter den getroffenen Annahmen, bezüglich der Herstellungsenergie von Solaranlagen ist der Betrieb des FLYERs mit Solarstrom nicht eindeutig umweltfreundlicher als der Betrieb mit dem Schweizer Strommix. In diese Betrachtung ist einzubeziehen, dass das Herstellungsverfahren für Solaranlagen laufend auch aus ökologischer Sicht optimiert wird. Zudem kann davon ausgegangen werden, dass bei der zukünftigen Öffnung der Strommärkte Wasserkraftanteile durch thermisch-fossil erzeugte Strom ersetzt werden – damit wird der Strom tendenziell klar umweltbelastender.

#### FAZIT 4:

**Der Betrieb des FLYERs mit Solarstrom ist unter den getroffenen Annahmen nicht eindeutig umweltfreundlicher als der Betrieb mit dem Schweizer Strommix.**

**Es bleibt der persönlichen Wertung überlassen, ob die Reduktion der Emission radioaktiver Substanzen um knappe 50% wünschenswerter ist als die Erhöhung der luft- und wasserbelastenden Substanzen um rund 10%.**



## 6. Energiesparpotential

In diesem Abschnitt wird auf eine der Hauptfragen dieser Studie eingegangen: Wie gross sind die durch den Einsatz des FLYERs heute und in Zukunft erreichbaren Energiesparpotentiale, wie werden die Luftemissionen reduziert?

### 6.1 Ist-Zustand

Aus den Ergebnissen der Umfrage bei 53 FLYER-KundInnen (vgl. Kapitel 2.8) wird das Substitutionspotential des FLYERs ermittelt. Die Daten erlauben differenzierte Aussagen dazu, welche Verkehrsmittel heute von den befragten Personen durch FLYER-Fahrten ersetzt werden.

Die im Fragebogen aufgeführten Antwortkategorien zu den Verkehrsmitteln decken sich nicht genau mit den bilanzierten Substitutionsfahrzeugen. Für die Zuordnung werden deshalb gewisse Anpassungen vorgenommen (vgl. Tabelle 13).

So sind in der Ökobilanz keine Elektromobile aufgeführt. Die geringe Anzahl ersetzter Elektromobile (3.8%) wird deshalb den Personenwagen zugeschrieben. Die für die Befragung sinnvolle Unterscheidung der beiden Antwortkategorien Tram/Bus und Bahn/Postauto muss für die Ökobilanzierung ebenfalls umgeschrieben werden. Die prozentualen Anteile werden je halbiert und auf die Fahrzeuge Regionalbus, Tram und Regionalzug verteilt (Bus und Postauto werden beide dem Regionalbus zugeordnet). Für die „zu Fuss“ oder „gar nicht“ zurückgelegten Wege wird angenommen, dass sie keine Umweltbelastungen verursachen – entsprechend führt der Ersatz durch den FLYER hier zu einer Mehrbelastung.

Tabelle 13 zeigt die Antworten der Befragung und die daraus abgeleiteten und für die Berechnungen des Energiesparpotentials verwendeten Werte.

Substitutionsfahrzeuge	Angaben bei Befragung	Verwendete Werte
Velo	26.7 %	26.7 %
Mofa	2.3 %	2.3 %
Roller	6.1 %	6.1 %
Motorrad	3.8 %	3.8 %
PW	24.4 %	28.2 %
Elektromobil	3.8 %	
Tram/Bus	10.7 %	
Bahn/Postauto	14.5 %	
Regionalbus		12.6 %
Tram		5.3 %
Regionalzug		7.3 %
zu Fuss	5.3 %	5.3 %
hätte Fahrt nicht gemacht	2.3 %	2.3 %

*Tabelle 13: Anteile der ersetzten Fahrzeuge laut Angaben in den Fragebogen und hier verwendete Werte*

Insbesondere die Breite des Substitutionspotentials darf als überraschend und wegweisend für die Zukunft bezeichnet werden. Bisher wurde meistens davon ausgegangen, dass mit muskelkraftverstärkenden Zweirädern primär Fahrradfahrten ersetzt werden. Diese Annahme wird mit der vorliegenden Studie widerlegt: Die befragten Personen ersetzen mit dem FLYER zu

- 29% das Auto
- 27% das Fahrrad
- 25% den öffentlichen Verkehr
- 12% Mofa, Roller, Motorrad (vgl. Abbildung 38).

Erfreulich ist, dass praktisch keine zusätzliche Mobilität verursacht wird - die Grundidee des FLYERs als nützliches Alltagsverkehrsmittel wird somit nicht nur von den Entwicklern, sondern auch von den FLYER-FahrerInnen getragen.

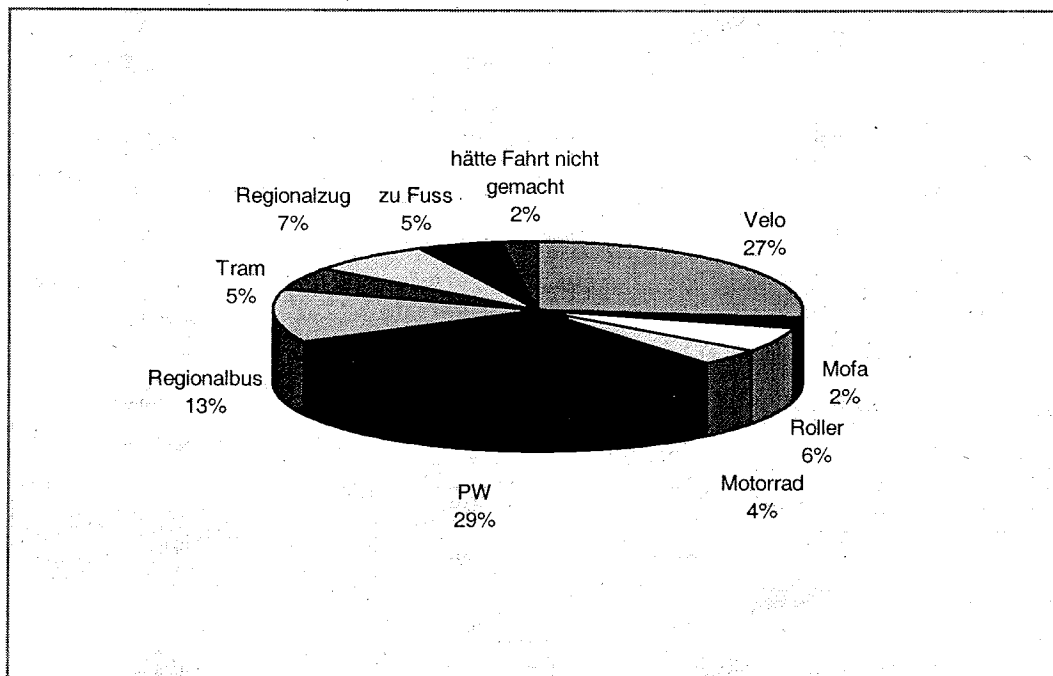


Abbildung 38: Anteile der ersetzten Fahrzeuge

Zu bemerken ist, dass die befragten Personen nicht als repräsentativ für die Gesamtbevölkerung betrachtet werden dürfen. Die ErstkäuferInnen des FLYERs weisen z.B. ein überdurchschnittliches Verständnis für Mobilitäts-, Energie- und Umweltfragen auf. Sie können überwiegend als Innovatoren bezeichnet werden, die bereits in der Einführungsphase eines Produkts dessen Vorteile zu nutzen und zu schätzen wissen. Diesem Umstand wird bei der Berechnung des Szenarios 2003 Rechnung getragen (vgl. Kapitel 6.2).

Die nachfolgend beschriebene Verringerung der Umweltbelastungen entspricht der Situation, wie sie aufgrund der Angaben der befragten Personen zur Zeit erreicht

wird. Die Daten beziehen sich auf 53 FLYER (entspricht der Anzahl auswertbarer Fragebogen), die ausschliesslich mit Bleiakkumulatoren ausgerüstet sind.

Die Einsparung an Umweltauswirkungen ergibt sich aus der Differenz der Umweltauswirkungen des FLYERs und den Umweltauswirkungen der Substitutionsfahrzeuge. Die Ergebnisse werden auf drei verschiedene Arten dargestellt:

1. Gesamte Einsparungen der 53 FLYER während der ganzen Lebenszeit (Annahme: Lebensdauer 40'000 km)
2. Einsparungen pro FLYER und Jahr (Annahmen: Jahresfahrleistung 2'000 km bzw. 8 km pro Arbeitstag)
3. Einsparungen pro Kilometer Fahrt.

Tabelle 14 zeigt die heute effektiv durch die 53 FLYER-FahrerInnen erzielten Einsparungen an Energie, Energieträgern und Luftemissionen (Ist-Situation). Angenommen wird, dass die FLYER während der ganzen Lebensdauer in derselben prozentualen Verteilung Fahrzeuge substituieren, wie in der Befragung angegeben wurde (detaillierte Zahlen befinden sich in Anhang 5).

		53 FLYER pro 40'000 km	pro FLYER und Jahr (2'000 km)	Pro Personenkilo- meter
<b>Ressourcenbezogener Energiebedarf</b>				
Holz	kg	36	0.03	0.00002
Pot. Energie Wasser	MJ	89'923	84.83	0.04242
<b>Total erneuerbar</b>	<b>MJ</b>	<b>90'574</b>	<b>85.45</b>	<b>0.04272</b>
Rohbraunkohle	kg	724	0.68	0.00034
Rohgas (Erdgas)	m <sup>3</sup>	3'308	3.12	0.00156
Rohsteinkohle	kg	3'098	2.92	0.00146
Rohöl ab Bohrloch	kg	44'218	41.71	0.02086
Uran ab Erz	kg	38	0.04	0.00002
<b>Total nicht erneuerbar</b>	<b>MJ</b>	<b>2'218'130</b>	<b>2'092.58</b>	<b>1.04629</b>
<b>Gesamttotal</b>	<b>MJ</b>	<b>2'306'921</b>	<b>2'176.34</b>	<b>1.08817</b>
<b>Luftemissionen</b>				
Kohlendioxid fossil (CO <sub>2</sub> )	kg	134'861'150	127'227.50	63.61375
Kohlenmonoxid (CO)	kg	6'058'937	5'715.98	2.85799
Lachgas (N <sub>2</sub> O)	kg	16'822	15.87	0.00793
Methan (CH <sub>4</sub> )	kg	258'444	243.82	0.12191
NM VOC	kg	1'400'040	1'320.79	0.66040
Radioaktive Substanzen	kBq	3'356'935	3'166.92	1.58346
Schwefeloxide (SO <sub>x</sub> ) als SO <sub>2</sub>	kg	230'121	217.10	0.10855
Staub / Partikel	kg	40'753	38.45	0.01922
Stickoxide (NO <sub>x</sub> ) als NO <sub>2</sub>	kg	771'197	727.54	0.36377

Tabelle 14: Einsparungen durch FLYER-Fahrten

In den Einheiten kg, MJ, m<sup>3</sup> oder kBq sind diese Zahlen oft nur schwer in einen Praxiszusammenhang zu setzen. Deshalb werden sie nachstehend in einfach nachvollziehbare Beispiele umgesetzt:

- Das Gesamttotal der Einsparungen an erneuerbaren und nicht erneuerbaren Energieträgern (bei 53 FLYERn zu je 40'000 km Gesamtlebensdauer) beträgt 2'300'000 MJ. Dies entspricht z.B.:
  - der durchschnittlichen Jahresproduktion eines Solarkraftwerkes mit 6'000 m<sup>2</sup> Fläche Solarzellen (knapp so gross wie zwei Drittel eines Fussballfelds) oder
  - dem Jahresenergieverbrauch von 250 Schweizer Haushalten (ohne elektrische Boiler).
- Pro Personenkilometer wird mit 1,088 MJ die Energie gespart, mit der das Wasser für rund 1 Minute warm duschen geheizt werden kann.
- Die 44'218 kg Rohöl ab Bohrloch, die mit den 53 FLYERn während ihrer Lebenszeit eingespart werden, entsprechen dem Inhalt von rund 265 Ölfässern - oder rund 5 Ölfässern pro FLYER.
- Der eingesparte CO<sub>2</sub>-Ausstoss von rund 134 Tonnen entspricht dem Ausstoss von 25 Personenwagen in einem Jahr (bei einer angenommenen Fahrleistung von 17'000 km und einem Verbrauch von 9,4 Litern auf 100 km).

Diese allein mit 53 FLYERn erreichten Werte zeigen, dass muskelkraftverstärkende Zweiräder ein wesentliches Umweltentlastungspotential besitzen. Dieses Potential kann im Alltagsverkehr vor allem mit leistungsfähigen Elektrobikes ausgeschöpft werden: Mit der Wendigkeit, dem geringen Energieverbrauch, der Geschwindigkeit von rund 30 km/h (bei einer Reichweite bis 50 km), der aktiven Bewegung und vor allem dem neuen Fahrspass bieten diese Fahrzeuge gegenüber anderen Verkehrsmitteln im Nahverkehr echten Zusatznutzen.

### 6.1.1 Energieverbrauch mit und ohne Einsatz des FLYERs Pb

Insbesondere interessiert natürlich auch die Berechnung der Werte, die sich aus dem direkten Vergleich der Situation *mit* dem Einsatz des FLYERs und der Situation *ohne* Einsatz des FLYERs ergeben. Alle Daten beziehen sich auf die Werte des FLYER Pb, da aktuell nur dieses Modell von BKTech angeboten wird. Die folgenden Abbildungen sollen diese Werte veranschaulichen. Der Energieverbrauch und die Luftemissionen der substituierten Fahrzeuge (vgl. Abbildung 38) werden den entsprechenden Werten des FLYERs gegenübergestellt. Die Differenz entspricht den in Tabelle 14 aufgelisteten Werten **pro Personenkilometer**.

Die Abbildungen 39 und 40 zeigen, dass am meisten nicht erneuerbare Energie eingespart werden kann und davon vor allem Energie, die aus fossilen Energieträgern wie Erdöl oder Kohle stammt. Dieses Ergebnis ist einleuchtend: 53% der ersetzten Fahrzeuge werden mit Verbrennungsmotoren angetrieben (Mofa,

Roller, Motorrad, Personenwagen und Regionalbus). Die Stromeinsparungen dagegen sind geringer, da der Anteil an ersetzten strombetriebenen Fahrzeugen nur 13% beträgt (Tram und Regionalzug). Damit ist auch die nur leichte Reduktion an Verbrauch von Uran und Wasserkraft erklärt.

Bei der erneuerbaren Energie ist der Verbrauch ohne den Einsatz der FLYER rund doppelt so hoch, bei der nicht erneuerbaren Energie sogar rund fünfmal so gross.

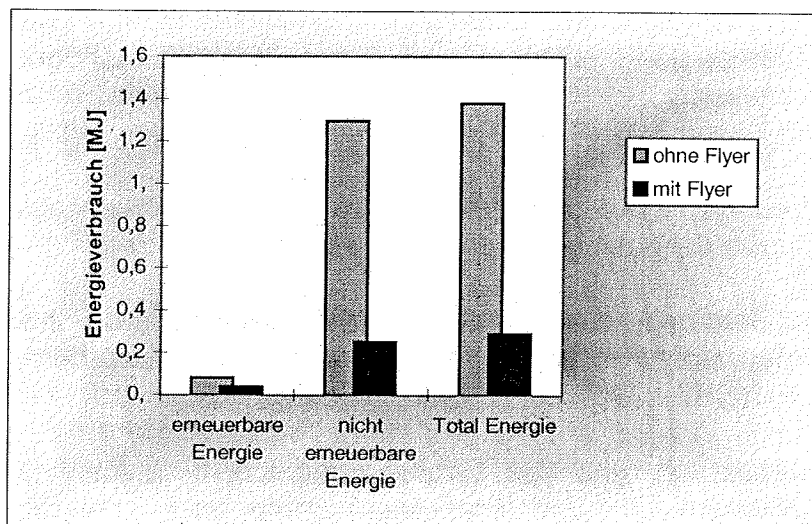


Abbildung 39: Vergleich der Situation ohne FLYER mit der Situation mit FLYER bezüglich Energieverbrauch

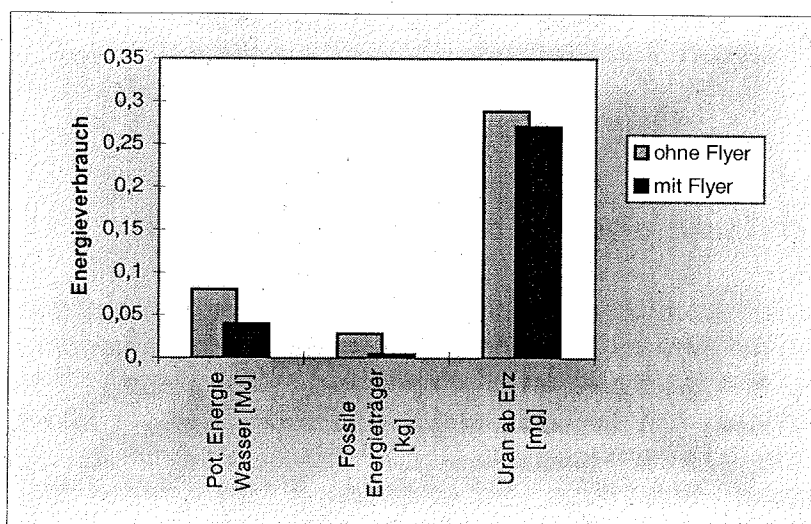


Abbildung 40: Vergleich der Situation ohne FLYER mit der Situation mit FLYER bezüglich Verbrauch an Energieträgern

### 6.1.2 Luftemissionen mit und ohne Einsatz des FLYERs

Die Abbildungen 41 und 42 zeigen, dass bei allen betrachteten Luftschadstoffen durch den Einsatz des FLYERs die Emissionen verringert werden. Die Einsparungen liegen durchschnittlich bei etwa 90%, für Kohlenmonoxid und Lachgas sogar bis 99%, für Staub/Partikel bei rund 65%.

Für radioaktive Stoffe können die Emissionen nur um 8% verringert werden. Dies folgt aus der relativ geringen Einsparung an Atomstrom. Wie im Szenario Solarstrom (vgl. Kapitel 5.6) gezeigt wird, können die Emissionen radioaktiver Substanzen durch die solare Produktion von Strom um rund die Hälfte reduziert werden.

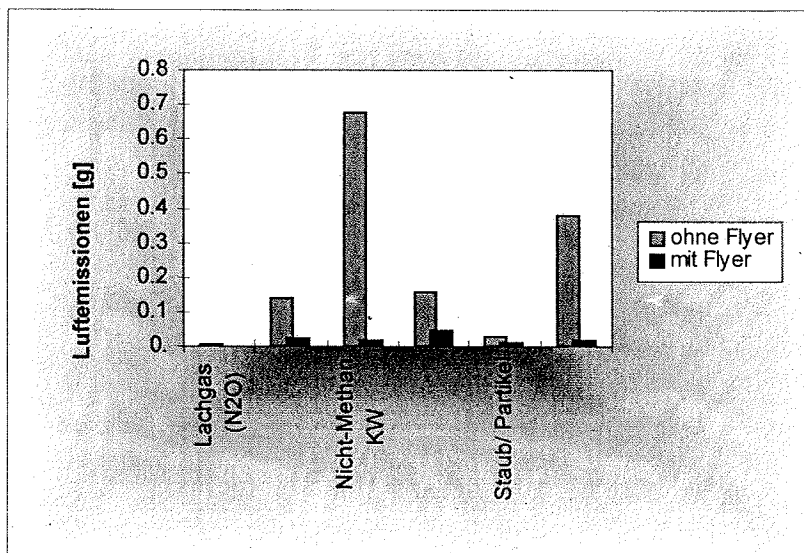


Abbildung 41: Vergleich der Situation ohne FLYER mit der Situation mit FLYER bezüglich Luftemissionen

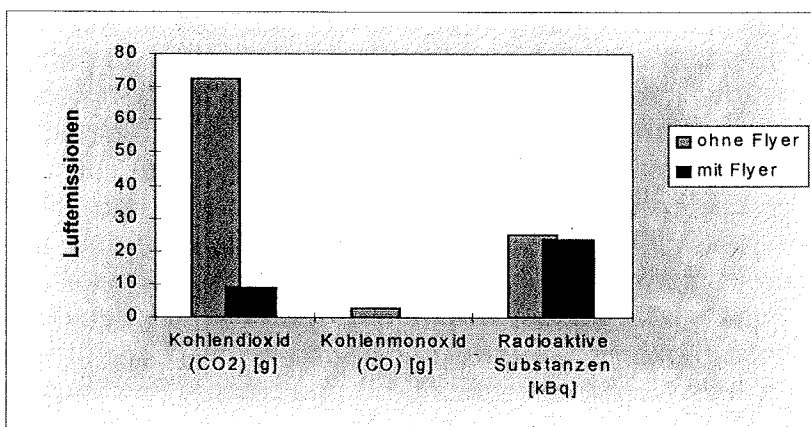


Abbildung 42: Vergleich der Situation ohne FLYER mit der Situation mit FLYER bezüglich Luftemissionen

**FAZIT 5:**

Der Einsatz von 53 FLYERn (à je 40'000 km Gesamtlebensdauer) führt zu einer deutlich messbaren Umweltentlastung: 2,3 Mio. MJ Energie (erneuerbare und nicht erneuerbare Energie) werden gespart und die Emission von Luftschadstoffen wird um durchschnittlich 90% reduziert.

Das Substitutionspotential des FLYERs ist überraschend breit und damit geeignet, Umweltentlastungen herbeizuführen:

- 29% Autofahrten
- 27% Fahrradfahrten
- 25% öffentliche Verkehrsmittel
- 12% Mofa/Roller/Motorrad

werden mit FLYER-Fahrten ersetzt.

**Merke:** Diese Ergebnisse sind für die befragten 53 Personen repräsentativ, nicht für die Gesamtbevölkerung. Für Zukunftsaussagen ist diesem Umstand Rechnung zu tragen (vgl. Kapitel 6.2 Szenario 2003).

## 6.2 Szenario 2003

Die Umweltauswirkungen der betrachteten 53 FLYER sind zwar im kleinen Rahmen bereits erfreulich. Dass die befragten Personen zu rund 29% das Auto, zu 27% das Fahrrad, zu 25% den öffentlichen Verkehr und zu rund 12% Mofa/Roller/Motorräder ersetzen, ist wie erwähnt überraschend und wegweisend für die zukünftige Entwicklung: Leistungsfähige Elektrobikes werden von PendlerInnen im täglichen Nahverkehr als echte, attraktive Alternative zum bisherigen angebotenen Verkehrsmittelmix wahrgenommen. Es ist anzunehmen, dass sich dieser Markt in den nächsten drei bis fünf Jahren weltweit stark entwickeln wird.

Es stellt sich die Frage, welche Effekte und Umweltauswirkungen zu erwarten sind, wenn muskelkraftverstärkende Zweiräder als Massenprodukt eingesetzt werden. Die bisherigen, auf die 53 befragten Personen bezogenen Daten zeigen sicher nicht ein für die Gesamtbevölkerung repräsentatives Bild. In diesem Abschnitt wird deshalb das Substitutionspotential bzw. die prozentuale Verteilung der durch FLYER-Fahrten ersetzten Fahrzeuge aufgrund von Expertenmeinungen und einer Studie von Sammer 1992 zu einem Neuen Motorisierten Zweirad (NMZ) so angepasst, dass sie als realistische Schätzung für eine breite Bevölkerung gelten können.

Folgende Verteilung der Substitutionsfahrzeuge wird angenommen:

- 33% Fahrräder
- 25% Autos
- 25 % Öffentlicher Verkehr
- 10% Roller/Motorräder
- 7% Diverse (zu Fuss, zusätzliche Mobilität, etc.)

Unter sonst gleichbleibenden Annahmen und Bedingungen werden die Berechnungen, wie sie für 53 FLYER Pb durchgeführt wurden, im Szenario 2003 für 10'000 FLYER NiCd bzw. FLYER-ähnliche Elektrobikes durchgeführt. Tabelle 15 zeigt die durch den Einsatz dieser 10'000 Fahrzeuge erzielbaren Einsparungen an Energie, Energieträgern und Luftemissionen. Angenommen wird, dass die Fahrzeuge während der ganzen Lebensdauer in der oben angenommenen prozentualen Verteilung Fahrzeuge substituieren (siehe auch Anhang 5).

		10'000 FLYER pro 40'000 km	pro FLYER und Jahr (2'000 km)	Pro Personenkilometer
<b>Ressourcenbezogener Energiebedarf</b>				
Holz	kg	8'054	0.04	0.00002
Pot. Energie Wasser	MJ	22'063'603	110.32	0.05516
<b>Total erneuerbar</b>	<b>MJ</b>	<b>22'219'000</b>	<b>111.10</b>	<b>0.05555</b>
Rohbraunkohle	kg	223'459	1.12	0.00056
Rohgas (Erdgas)	m <sup>3</sup>	667'389	3.34	0.00167
Rohsteinkohle	kg	714'457	3.57	0.00179
Rohöl ab Bohrloch	kg	8'048'188	40.24	0.02012
Uran ab Erz	kg	33'003	0.17	0.00008
<b>Total nicht erneuerbar</b>	<b>MJ</b>	<b>423'569'600</b>	<b>2'117.85</b>	<b>1.05892</b>
<b>Gesamttotal</b>	<b>MJ</b>	<b>445'559'200</b>	<b>2'227.80</b>	<b>1.11390</b>
<b>Luftemissionen</b>				
Kohlendioxid fossil (CO <sub>2</sub> )	kg	24'320'600'000	121'603.00	60.80150
Kohlenmonoxid (CO)	kg	1'1231'264'400	6'156.32	3.07816
Lachgas (N <sub>2</sub> O)	kg	2'971'085	14.86	0.00743
Methan (CH <sub>4</sub> )	kg	47'800'920	239.00	0.11950
NMVOC	kg	248'789'200	1'243.95	0.62197
Radioaktive Substanzen	kBq	2'857'560'000	14'287.8	7.14390
Schwefeloxide (SO <sub>x</sub> ) als SO <sub>2</sub>	kg	8'930800	44.65	0.02233
Staub / Partikel	kg	7'221'200	36.11	0.01805
Stickoxide (NO <sub>x</sub> ) als NO <sub>2</sub>	kg	128'655'240	643.28	0.32164

Tabelle 15: Einsparungen durch zukünftige FLYER-Fahrten



- Das Gesamttotal der Einsparungen an erneuerbaren und nicht erneuerbaren Energieträgern beträgt 445'559'200 MJ. Dies entspricht z.B.:
  - der durchschnittlichen Jahresproduktion eines Solarkraftwerkes mit rund 1'162'000 m<sup>2</sup> Fläche Solarzellen (etwa so gross wie 120 Fussballfelder) oder
  - dem Jahresenergieverbrauch von 4'450 Schweizer Haushalten (ohne elektrische Boiler).
- Die 8'048'188 kg Rohöl ab Bohrloch, die mit den 10'000 Fahrzeugen während ihrer Lebenszeit eingespart werden, entsprechen dem Inhalt von rund 48289 Ölfässern.
- Der eingesparte CO<sub>2</sub>-Ausstoss von rund 24'320 Tonnen entspricht dem Ausstoss von 4'615 Personenwagen in einem Jahr (bei einer angenommenen Fahrleistung von 17'000 km und einem Verbrauch von 9,4 Litern auf 100 km).

Die Verbindung von Muskelkraft und Elektroantrieb führt zu einem völlig neuen Fahrgefühl und eröffnet neue Dimensionen. Neben den realen Umweltentlastungen durch den Einsatz von muskelkraftverstärkenden Zweirädern kommt ein wichtiger Effekt hinzu: Es werden mobilitätsbezogene Denkprozesse ausgelöst und neue Themen in den Vordergrund gerückt. Plötzlich interessieren Wirkungsgrade, effizienter Einsatz der Energie, verschiedene Arten der Stromproduktion oder die effektiven Kosten herkömmlicher Verkehrsmittel. Das bisherige Mobilitätsverhalten wird hinterfragt, ein neues Mobilitätsverständnis entsteht. Es ist anzunehmen, dass dieses neue Interesse und das neue Wissen auch Auswirkungen auf andere Lebensbereiche haben wird.

Und vor allem: Die einfache, gesunde, günstige und effiziente Fortbewegung hat den Vorteil, dass sie halt einfach Spass im Alltagsverkehr bietet!

#### **SCHLUSS:**

**Die Entwicklung der muskelkraftverstärkenden Zweiräder steht erst am Anfang. Werden die Entwicklung des Stadtfahrrads, die heutigen Umweltbelastungen durch den Verkehr und das durch den FLYER erreichbare Substitutionspotential betrachtet, stellt dieses neue Verkehrsmittel eine sinnvolle und notwendige Ergänzung der heutigen Mobilität dar.**

**Die Verbesserungspotentiale beim FLYER liegen vor allem in einem effizienten Akkumanagementsystem und damit einer hohen Lebensdauer der Akkus sowie in der konsequent geregelten Entsorgung der Akkus.**

**Es kann davon ausgegangen werden, dass dieses innovative Verkehrsmittel in Zukunft einen wesentlichen Beitrag zu einem neuen Mobilitätsverständnis leisten wird.**

## 7. Literaturliste

- Aktiv Rad Fahren (1994): Ökologie im Rahmenbau. Nr. 3/1994, Seite 92. Bielefeld: Bielefelder Verlagsanstalt.
- Angerer G. et al. (1993): Verwertung von Elektronikschrott, Stand der Technik, Forschungs- und Technologiebedarf. Berlin: Fraunhofer Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung.
- Baustock I., Hancock GF. (1979): Handbook of Industrial Energy Analysis. New York: Halsted Press.
- Bukowiecki Alexandre, Mussler Philippe (1993): Ressourcenbedarf des Leichtmobils. Semesterarbeit Abt. VIII. Zürich: ETH.
- BUWAL (1990): Methodik für Ökobilanzierung auf der Basis ökologischer Optimierung. Schriftenreihe Umweltschutz, Nr. 133. Bern: BUWAL.
- BUWAL (1991): Ökobilanz von Packstoffen. SRU 132. Bern: BUWAL.
- BUWAL (1992): Anorganische Zusammensetzung von Computereinzelteilen. Bern: BUWAL.
- BUWAL (1996): Ökoinventare für Verpackungen. Schriftenreihe Umwelt, Nr. 250, Band 1 und 2. Bern: BUWAL.
- Ecosens AG (1995): Energetische und gesamtökologische Beurteilung verschiedener Antriebssysteme für Leichtmobile. Forschungsprogramm: Rationelle Energienutzung im Verkehr. Bern: Bundesamt für Energiewirtschaft.
- Etterlin G., Hürsch P., Topf M. (1992): Ökobilanzen: Ein Leitfaden für die Praxis. Mannheim: Wissenschaftsverlag.
- Fecker Ivo (1992): Was ist eine Ökobilanz? St. Gallen: EMPA.
- Frischknecht R. (1992): Ökobilanz: Motivation - Möglichkeiten - Grenzen. Zürich.
- Frischknecht R., Hofstetter P., Knoepfel I., Ménard M. (1994): Ökoinventare für Energiesysteme. Schlussbericht BEW/NEFF-Forschungsprojekt: Umweltbelastung der End- und Nutzenergiebereitstellung. Bern: ENET.
- Frischknecht R., Koler P. (1995): Modellansatz und Algorithmus zur Berechnung von Ökobilanzen im Rahmen der Datenbank ECOINVENT, in: Schmidt M., Schorb A. (Hrsg.), Stoffstromanalyse in Ökobilanzen und Ökoaudits. Berlin/Heidelberg: Springer Verlag.
- Gottlieb Duttweiler Institut (1992): Ökobilanzen: Grenzen und Möglichkeiten (Fachtagung). Rüschlikon/Zürich: Gottlieb Duttweiler Institut.
- Greenpeace (1991): Ökobilanz Auto. Amsterdam, Zürich: Greenpeace.

Greenpeace (1991): Gift bleibt Gift, Sackgasse Müllverbrennung. Zürich.

Heijungs R. et al. (1992) Environmental Life Cycle Assessment of Products. Leiden/NL: Centre of Environmental Science.

Ingenieurschule Biel (1995): Ermittlung von Abgasemissionsfaktoren von Strassenfahrzeugen in der Schweiz, Teil 3: Motorisierte Zweiräder. Bern: BUWAL.

Interkantonale Lehrmittelzentrale (1987): Tiptopf. Bern: Staatlicher Lehrmittelverlag.

Kasser Ueli (1995): Graue Energie von Baustoffen. Zürich: Büro für Umweltchemie.

Maibach Markus, Peter Daniel, Seiler Benno (1995): Oekoinventar Transporte: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Transportsystemen und für den Einbezug von Transportsystemen in Oekobilanzen. Schwerpunktprogramm Umwelt. Infrac.

May Markus (1996): Graue Energie und Umweltbelastungen von Heizungssystemen. Oberburg: Jenni Energietechnik.

NZZ (1995): Recycling von Nickel-Cadmium-Akkumulatoren. Seite Forschung und Technik, 29. März 1995.

Reist (1996): Mündliche Information Hr. Reist. Yverdon: Leclanché.

Sammer G., Fallast K., Wernsperger F. (1992): Stadtverkehr der Zukunft: Forschungsprojekt neues motorisiertes Zweirad (Kurzfassung). Essen: Industrieverband Motorrad Deutschland e.V.

Scholz Roland W., Bösch Sandro, Koller Theo, Mieg Harald A., Stünzi Jürg (1995): Industriearial Sulzer-Escher Wyss. Umwelt und Bauen: Wertschöpfung durch Umnutzung. UNS-Fallstudie 95. Zürich: Hochschulverlag AG an der ETH Zürich.

Soldera Marco (1995): Öko-Computer. Vergleich eines Öko-PC mit einem herkömmlichen PC anhand von Lebenszyklusanalysen LCA. Gebensdorf: Eigenverlag.

Tagesanzeiger (1996): Goldgräber im Computerschrott. 15. November 1996, S. 94. Zürich: Tagesanzeiger.

The NiCd Electric Vehicle Information Center. 42, Weymouth Street, London W1N3LQ, UK

Trüeb Lucien F. (1996): Die chemischen Elemente. Ein Streifzug durch das Periodensystem. Stuttgart, Leipzig: S. Hezel Verlag.

- 
- Van den Berg N. W., Dutilh C. E., Huppes G. (1995): Beginning LCA. A guide into environmental Life Cycle Assessment. Leiden: Centrum voor Milieukunde.
- Velojournal (1996): Nummer 5. Verein Velojournal: Zürich.
- Weibel Thomas (1996): persönliche Information, aufgrund „Relative Life Cycle Assessment of Hybrid Vehicles. A Tool for Decision support for local Zero Emission Mobility. Brite Euram Program.“ Zürich: unveröffentlichte Arbeit.
- Walder Ernst, Hofstetter Patrick, Frischknecht Rolf (1991): Bewertungsmodelle für Ökobilanzen. Arbeitspapier 2/91 des Projektes: Umweltbelastung durch die End- und Nutzenergiebereitstellung. Zürich: Laboratorium für Energiesysteme.

## 8. Verzeichnis der Tabellen und Abbildungen

### Tabellen

- A) Auslastung und Kapazität von PW, Regionalbus, Tram und Regionalzug
1. Zusammensetzung der verschiedenen Elektrizitätsmodelle
  2. Energieumrechnungstabelle
  3. Verschiedene Recyclingmethoden und Einbezug in die Bilanzierung
  4. Datenqualität der bilanzierten Bereiche
  5. Lebensdauer der Hauptmaterialien und Verschleisssteile
  6. Anteile der Entsorgungsarten für Elektronikschrott
  7. Anteile der Entsorgungsarten des FLYERs (ohne Batterien und Elektronik)
  8. Verknüpfung mit anderen Ökoinventaren
  9. Übersicht zu den Durchschnittswerten der Händlerbefragung
  10. Emissionswerte motorisierter Zweiräder pro 100 km
  11. Auslastung und Kapazität von PW, Regionalbus, Tram und Regionalzug
  12. Anteil an Energieträgern des Schweizer Strommixes und bei der Herstellung von Solaranlagen
  13. Anteile der ersetzten Fahrzeuge laut Fragebogen und verwendete Werte
  14. Einsparungen durch FLYER-Fahrten
  15. Einsparungen durch zukünftige FLYER-Fahrten

### Abbildungen

- A) Energieverbrauch pro Personenkilometer (erneuerbar; nicht erneuerbar)  
B) Energieverbrauch pro Personenkilometer (Herstellung, Unterhalt, Entsorgung)  
C) Anteile der ersetzten Fahrzeuge (Befragung)  
D) Anteile der ersetzten Fahrzeuge (Szenario 2003)
1. Studienziele
  2. Systemgrenze dieser Studie
  3. Verschiedene Recyclingmethoden
  4. Materialanteile von Bleiakkumulatoren
  5. Materialanteile von Nickel-Cadmium-Akkumulatoren
  6. Verfahrensschritte der Entsorgung von Bleiakkumulatoren
  7. Verfahrensschritte zur Entsorgung von Nickel-Cadmium-Akkumulatoren
  8. Annahmen zur Entsorgung von Elektronikschrott
  9. Vergleich des Energieverbrauchs zur Herstellung eines Satzes Blei- bzw. Nickel-Cadmium-Akkumulatoren aufgetrennt nach Bereitstellung des Materials, Transporte und Prozessenergie
  10. Energieverbrauch zur Herstellung der Hauptmaterialien pro Akku-Satz
  11. Vergleich des Energieverbrauchs zur Herstellung von Blei- bzw. Nickel-Cadmium-Akkumulatoren für die Lebensdauer eines FLYERs aufgetrennt nach Bereitstellung des Materials, Transporte und Prozessenergie

12. Abfall der Akkumulatoren pro Personenkilometer, aufgetrennt nach Abraum und anderem Abfall
13. Anteil des Akkumulatorenabfalls am Abfall des gesamten FLYERs pro Personenkilometer
14. Schwefeldioxidemissionen pro Personenkilometer beim FLYER
15. Energieverbrauch pro Personenkilometer
16. Energieverbrauch pro Personenkilometer
17. Prozentualer Anteil von Betrieb, Bereitstellung der Betriebsenergie und Herstellung, Unterhalt, Entsorgung am Energieverbrauch pro Personenkilometer
18. Vergleich des Energieverbrauchs pro Personenkilometer bei einer Lebensfahrleistung von 70'000 km (Motorrad) und 150'000 km (PW) bzw. von je 100'000 km für beide Fahrzeuge
19. Vergleich des Energieverbrauchs pro Personenkilometer von Roller und PW bei durchschnittlicher maximaler Auslastung
20. Kohlendioxidemissionen pro Personenkilometer
21. Kohlenmonoxidemissionen pro Personenkilometer
22. Lachgasemissionen pro Personenkilometer
23. Methanemissionen pro Personenkilometer
24. Emissionen von Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffen pro Personenkilometer
25. Schwefeloxidemissionen pro Personenkilometer
26. Emissionen von Staub/Partikel pro Personenkilometer
27. Stickoxidemissionen pro Personenkilometer
28. Emissionen radioaktiver Substanzen pro Personenkilometer
29. Wirkungen der einzelnen Fahrzeuge auf den Treibhauseffekt
30. Wirkungen der einzelnen Fahrzeuge auf die Überdüngung
31. Wirkungen der einzelnen Fahrzeuge auf die Versauerung
32. Wirkungen der einzelnen Fahrzeuge auf den Ozonabbau
33. Wirkungen der einzelnen Fahrzeuge auf die Smogbildung
34. Kritisch belastetes Luftvolumen pro Personenkilometer
35. Belastetes Wasservolumen pro Personenkilometer
36. Umweltbelastungspunkte der einzelnen Fahrzeuge
37. Vergleich der Emissionen radioaktiver Stoffe pro Personenkilometer beim Betrieb des FLYERs mit Schweizer Strom und Solarstrom
38. Anteile der ersetzten Fahrzeuge (Ist-Zustand)
39. Vergleich der Situation ohne FLYER mit der Situation mit FLYER bezüglich Energieverbrauch
40. Vergleich der Situation ohne FLYER mit der Situation mit FLYER bezüglich Verbrauch an Energieträgern
41. Vergleich der Situation ohne FLYER mit der Situation mit FLYER bezüglich Luftemissionen
42. Vergleich der Situation ohne FLYER mit der Situation mit FLYER bezüglich Luftemissionen

## Anhang 1

In diesem Anhang sind die Inputdaten in tabellarischer Form aufgelistet. Die Beschreibung der Datenquellen und die Annahmen, die zu diesen Daten führten, sind in Kapitel 3 „Inputdaten FLYER“ sowie in Kapitel 4 „Inputdaten Substitutionsfahrzeuge“ zu finden. Alle Grössen beziehen sich auf die Lebensdauer eines Fahrzeuges. Die Daten sind auf folgende Tabellen aufgeteilt worden:

- Tabelle 16: Inputdaten FLYER Herstellung
- Tabelle 17: Inputdaten FLYER Betrieb/Unterhalt
- Tabelle 18: Inputdaten FLYER Entsorgung
- Tabelle 19: Inputdaten Velo
- Tabelle 20: Inputdaten motorisierte Zweiräder

## Anhang 2

Anhang 2 enthält die zusammengefasste Resultattabelle (Tabelle 21). Diese Tabelle enthält die Schlüsselgrössen, die in Kapitel 5.1 „Vergleich von Schlüsselgrössen“ zum Vergleich der Fahrzeuge verwendet wurden. Alle Grössen beziehen sich auf Personenkilometer.

## Anhang 3

In den Tabellen 22 und 23 werden der Energieverbrauch und die Luftemissionen des FLYERs mit denjenigen der durch ihn ersetztten Fahrzeuge verglichen. Als Ergebnis erhält man die heutigen Einsparungen (Tab. 22) sowie das Potential im Jahre 2003 (Tab. 23).

Herstellung				Bleiakkumulatoren				Nickel-Cadmium-Akkumulatoren				Velo				Motor				Kiste			
	Einheit	Grösse	Datenqualität	Quelle	Grösse	Datenqualität	Quelle	Grösse	Datenqualität	Quelle	Grösse	Datenqualität	Quelle	Grösse	Datenqualität	Quelle	Grösse	Datenqualität	Quelle	Grösse	Datenqualität	Quelle	
Materialien	Stahl	kg			1,932	mittel	Eosens 1995	7,205	gut	Villiger 1995	0,760	mittel	eigene Schätzung	0,865	gut	eigene Messung							
	Stahl galvanisiert	kg	0,030	gut	eigene Messung	0,030	gut	eigene Messung		eigene Messung				0,020	gut	eigene Messung							
	Alu	kg	0,004	gut	eigene Messung	0,004	gut	eigene Messung						0,750	mittel	eigene Schätzung							
	Blei	kg	2,778	mittel	Eosens 1995																		
	Recyclingblei	kg	6,160	mittel	Eosens 1995																		
	Kupfer	kg	0,001	gut	eigene Messung	0,005	mittel	Eosens 1995						0,295	mittel	eigene Schätzung							
	Nickel	kg				1,420	mittel	Eosens 1995															
	Cadmium	kg				0,211	mittel	Eosens 1995															
	Recyclingcadmium	kg				0,491	mittel	Eosens 1995															
	Kobalt	kg				0,020	mittel	Eosens 1995															
	Titan	kg																					
	Polypolyphen	kg	0,744	mittel	Eosens 1995	0,312	mittel	Eosens 1995	0,310	mittel	Villiger 1995	0,005	mittel	eigene Schätzung	0,002	mittel	eigene Schätzung						
	Polyethylen	kg	0,005	mittel	Eosens 1995				0,315	mittel	Villiger 1995												
	PVC	kg	0,030	gut	eigene Messung	0,030	gut	eigene Messung										0,002	mittel	eigene Schätzung			
	Gummi	kg							1,550	gut	Villiger 1995												
	Teflon	kg																					
	Aradit	kg																					
	Kalibuge	kg				1,110	mittel	Eosens 1995															
	Schwefelsäure konz.	kg	1,697	mittel	Eosens 1995																		
	Destilliertes Wasser	kg	0,917	mittel	Eosens 1995																		
Sauerstoff	m³																						
Acetylen	kg							0,360	gut	Villiger 1995													
Argon	m³							0,007	gut	Villiger 1995													
Fluorac	l							0,650	gut	Villiger 1995													
Flussmittel	kg							0,250	gut	Villiger 1995													
Ultramarin	kg							0,015	gut	Villiger 1995													
Grundweiß	kg							0,060	gut	Villiger 1995													
Farbe	kg							0,150	gut	Villiger 1995													
Klarlack	kg							0,100	gut	Villiger 1995													
Elektronik	kg																						
Akustik	kg																						
Anders	kg	0,124	mittel	Eosens 1995																			
Gesamtgewicht	kg	12,581			5,353			14,275			1,912			2,237									
Prozessenergie	Strom Mittelspannung CH	kWh																					
	Strom Mittelspannung UCPTE	kWh	18,842	schlecht	Malbach 1995	8,030	schlecht	Malbach 1995	21,413	schlecht	Malbach 1995	2,860	schlecht	Malbach 1995	3,401	schlecht	Malbach 1995						
	Heizöl	kg	1,351	schlecht	Malbach 1995	0,650	schlecht	Malbach 1995	1,547	schlecht	Malbach 1995	0,207	schlecht	Malbach 1995	0,242	schlecht	Malbach 1995						
	Erdgas	m³	0,252	schlecht	Malbach 1995	0,112	schlecht	Malbach 1995	0,299	schlecht	Malbach 1995	0,040	schlecht	Malbach 1995	0,047	schlecht	Malbach 1995						
	Kohle	kg	0,948	schlecht	Malbach 1995	0,148	schlecht	Malbach 1995	0,398	schlecht	Malbach 1995	0,053	schlecht	Malbach 1995	0,052	schlecht	Malbach 1995						
	Propan	kg							0,800	gut	Villiger 1995												
	Emissionen in Luft	Blei	g	0,075	schlecht	Weibel 1995																	
		Cadmium	g				0,150	schlecht	Weibel 1995														
		Kobalt	g				0,005	schlecht	Weibel 1995														
		Nickel	g				0,190	schlecht	Weibel 1995														
	Emissionen in Wasser	Schwefelwasserstoff	g	30,400	schlecht	Weibel 1995																	
		Staub/Fasern	g				42,600	schlecht	Weibel 1995														
		Blei	g	0,050	schlecht	Weibel 1995																	
		Schwefelwasserstoff	g	6,370	schlecht	Weibel 1995																	
	Abfälle	SAVA	kg																				
		Transporte																					
		Hochseefrachter	km	341,000	schlecht	Malbach 1995	142,000	schlecht	Malbach 1995	225,000	mittel	Villiger 1995											
		Bahn UCPTE	km	12,400	schlecht	Malbach 1995	5,200	schlecht	Malbach 1995	9,000	mittel	Villiger 1995											
	LKW 24t	km	1,960	schlecht	Malbach 1995	0,760	schlecht	Malbach 1995	9,000	mittel	Villiger 1995												

Tabelle 16: Inputdaten Flyer, Herstellung



	Trittsgeräusch		Übertragung		Elektronik		Übrige Teile		Total Pb Herstellung		Total NiCd Herstellung	
	Einheit	Größe	Datenqualität	Quelle	Größe	Datenqualität	Quelle	Größe	Datenqualität	Quelle	Größe	Datenqualität
<b>Materialien</b>												
Stahl	kg	0,002	gut	eigene Messung	0,001	gut	eigene Messung	0,001	mittel	eigene Schätzung	10,210	mittel
Stahl galvanisiert	kg	0,076	gut	eigene Messung	0,060	gut	eigene Messung	0,001	mittel	eigene Schätzung	0,301	mittel
Alu	kg	1,198	gut	eigene Messung	0,160	gut	eigene Messung	9,604	mittel	eigene Schätzung	9,604	mittel
Blei	kg							2,779			0,000	
Recyclingblei	kg							0,160			0,000	
Kupfer	kg							0,120			0,000	
Nickel	kg							0,405			0,410	
Chrom	kg							0,000			1,420	
Recyclingchrom	kg							0,000			0,211	
Kobalt	kg							0,000			0,491	
Titan	kg	- 0,130	gut	eigene Messung				0,000			0,000	
Polypropylen	kg	0,001	gut	eigene Messung	0,001	gut	eigene Messung	0,002	mittel	eigene Schätzung	1,143	mittel
PVC	kg	0,047	gut	eigene Messung				0,079	mittel	eigene Schätzung	0,417	mittel
Gummi	kg	0,001	gut	eigene Messung				1,551			0,165	
Teflon	kg	0,001	gut	eigene Messung				0,001			1,551	
Araldit	kg				0,024	gut	eigene Messung	0,026			0,001	
Kalklauge	kg							0,000			0,000	
Schwefelsäure konz.	kg							1,119			1,119	
Desilliertes Wasser	kg							0,000			0,000	
Sauerstoff	m³							0,917			0,000	
Acetylen	kg							0,000			0,340	
Argon	m³							0,007			0,006	
Flussmittel	kg							0,007			0,007	
Flussmittel	kg							0,000			0,000	
Ultraformul	kg							0,260			0,000	
Grundierung	kg							0,016			0,016	
Farbe	kg							0,000			0,000	
Klebstoff	kg							0,160			0,160	
Elektronik	kg				0,375	gut	eigene Messung	0,100			0,100	
Altelektronik	kg				0,061	schlecht	Angerer 1993	0,375			0,375	
Anderes	kg							0,061			0,061	
Gewicht	kg	2,333						0,124			0,000	
					0,790			3,032			2,724	
<b>Prozessenergie</b>								0,000			0,000	
Strom Mittelspannung OH	kWh											
Strom Mittelspannung UCPTE	kWh	3,500	schlecht	Malbach 1996	0,993	schlecht	Malbach 1996	3,401			3,401	
Heizöl	kg	0,253	schlecht	Malbach 1996	0,072	schlecht	Malbach 1996	43,193			38,381	
Erdgas	m³	0,049	schlecht	Malbach 1996	0,014	schlecht	Malbach 1996	3,796			3,015	
Kohle	kg	0,005	schlecht	Malbach 1996	0,018	schlecht	Malbach 1996	0,732			0,691	
Propan	kg				0,022	schlecht	Malbach 1996	0,904			0,794	
<b>Emissionen in Luft</b>								0,000			0,000	
Blei	g							0,000			0,000	
Chrom	g							0,075			0,000	
Kobalt	g							0,000			0,180	
Nickel	g							0,000			0,006	
Schwefelwasserstoff	g							0,000			0,190	
Staub/Partikel	g							30,440			0,000	
<b>Emissionen in Wasser</b>								0,000			42,500	
Blei	g							0,000			0,000	
Schwefelwasserstoff	g							0,060			0,000	
								5,370			0,000	
<b>Abfälle</b>								0,000			0,000	
SAVA	kg							0,000			0,000	
<b>Transporte</b>								0,000			0,000	
Hochseefrachter	km							0,000			0,000	
Bahn UCPTE	km							665,000			368,000	
LKW 20t	km							21,400			14,200	
								10,860			9,790	

Tabelle 16: Inputdaten Flyer, Herstellung

[illegible]

Tabelle 17: Inputdaten Flyer; Betrieb/Unterhalt

Entsorgung		Bleakkumulatoren		Nickel-Cadmium-Akkumulatoren		Elektronik		Übrige Teile		Total Pb. Entsorgung Grösse	Total NiCd Entsorgung
	Einheit	Grösse	Datenqualität	Quelle	Grösse	Datenqualität	Quelle	Grösse	Datenqualität	Quelle	
<b>Energieverbrauch</b>											
Strom Niederspannung CH	kWh										
Strom Mittelspannung CH	kWh	1,335	mittel	Ecosens 1995							1,335
Strom Mittelspannung UOPE	kWh										
Heizöl	kg	0,268	mittel	Ecosens 1995							0,268
Erdgas	m³	0,340	mittel	Ecosens 1995							0,340
Kohle	kg	0,207	mittel	Ecosens 1995							0,207
<b>Emissionen in Luft</b>											
Blei	kg	0,000	schlecht	Ecosens 1995							0,000
Cadmium	kg	0,000	schlecht	Ecosens 1995							0,000
Staub	kg	0,000	schlecht	Ecosens 1995							0,000
<b>Emissionen in Wasser</b>											
Blei	kg	0,000	mittel	Ecosens 1995							0,000
Cadmium	kg	0,000	mittel	Ecosens 1995							0,000
<b>Abfälle</b>											
SAVA	kg										
Sondermülldeponie	kg	0,215	schlecht	Ecosens 1995			Angerer 1993				0,021
KVA	kg						Angerer 1993				0,237
Reststoffdeponie	kg	0,953	schlecht	Ecosens 1995	0,312	mittel	NZZ 1995	6,224	schlecht	Schmuckl 1996	6,224
Reaktordeponie	kg										0,953
							Angerer 1993	1,566	schlecht	Schmuckl 1996	1,875
<b>Recycling</b>											
direkte Wiederverwendung	kg										
stoffliche Verwertung	kg						Angerer 1993	1,428	schlecht	Schmuckl 1996	1,479
Öfenlopp	kg						Angerer 1993	0,013	schlecht		0,013
Kunststoff	kg	0,308	schlecht	Ecosens 1995							0,308
Natriumsulfat	kg	0,984	schlecht	Ecosens 1995							0,984
Alu	kg	0,094	gut	eigene Messung							0,094
Sanit galvanisiert	kg	0,090	gut	eigene Messung							0,090
Metallschrott	kg										
Closed loop	kg						NZZ 1995	12,602	schlecht	Schmuckl 1996	16,788
Bleisierungen	kg	6,150	mittel	Ecosens 1995	0,491	mittel	NZZ 1995				6,150
Cadmium	kg										0,491

Velo		Herstellung			Betrieb / Unterhalt			Entsorgung		
Einheit		Grösse	Datenqualität	Quelle	Grösse	Datenqualität	Quelle	Grösse	Datenqualität	Quelle
<b>Materialien</b>										
Stahl	kg	7,21	gut	Villiger 1996		0,84	mittel	eigene Schätzung		
Alu	kg	4,90	gut	Villiger 1996		0,27	mittel	eigene Schätzung		
Gummi	kg	1,55	gut	Villiger 1996		15,68	mittel	eigene Schätzung		
Polypropylen	kg	0,31	mittel	Villiger 1996						
Polyethylen	kg	0,32	mittel	Villiger 1996						
Glas	kg					0,003	mittel	eigene Schätzung		
Sauerstoff	kg	0,50	gut	Villiger 1996						
Acetylen	kg	0,10	gut	Villiger 1996						
Argon	m <sup>3</sup>	0,01	gut	Villiger 1996						
Fluxgas	l	0,05	gut	Villiger 1996						
Flussmittel	kg	0,25	gut	Villiger 1996						
Ultraformula	kg	0,02	gut	Villiger 1996						
Grundierung	kg	0,05	gut	Villiger 1996						
Farbe	kg	0,15	gut	Villiger 1996						
Klarlack	kg	0,10	gut	Villiger 1996						
Gewicht	kg	14,28	schlecht	Maibach 1995		16,79	schlecht	Maibach 1995		
<b>Prozessenergie</b>										
Strom Mittelspannung UCPT	kWh	21,41	schlecht	Maibach 1995		25,19	schlecht	Maibach 1995		
Heizöl	kg	1,55	schlecht	Maibach 1995		1,82	schlecht	Maibach 1995		
Erdgas	m <sup>3</sup>	0,30	schlecht	Maibach 1995		0,35	schlecht	Maibach 1995		
Kohle	kg	0,39	schlecht	Maibach 1995		0,47	schlecht	Maibach 1995		
Propan	kg	0,80	gut	Villiger 1996						
<b>Betriebsenergie</b>										
chemische Energie	kWh					888,90	schlecht	Tiptopf 1987		
<b>Abfälle</b>										
KVA	kg									
Reaktordeponie	kg					12,59	schlecht	Greenpeace 1991	5,68	schlecht
	kg					3,15	schlecht	Greenpeace 1991	1,42	schlecht
<b>Recycling</b>										
Direkte Wiederverwendung	kg									
open-loop:	kg									
Metallschrott	kg					1,05	schlecht	Bukowiecki 1993	1,43	schlecht
	kg									
<b>Transporte</b>										
Hochseefrachter	tkm	225,00	mittel	Villiger 1996						
Bahn UCPT	tkm	9,00	mittel	Villiger 1996						
LKW 28t	tkm	9,00	mittel	Villiger 1996						

Tabelle 19: Inputdaten Substitutionsfahrzeuge; Velo

Substitutionsfahrzeuge: Zweiräder									
Mofa			Roller			Motorrad			
Einheit	Grösse	Datenqualität	Quelle	Grösse	Datenqualität	Quelle	Grösse	Datenqualität	Quelle
Materialien									
	kg	0.5 schlecht	Umfrage		8 schlecht	Umfrage		5 schlecht	Umfrage
	kg	40 schlecht	Umfrage		55 schlecht	Umfrage		80 schlecht	Umfrage
	kg	7 schlecht	Umfrage		37 schlecht	Umfrage		95 schlecht	Umfrage
Gewicht	48			100			180		
Prozessenergie									
	kWh	72 schlecht	Maibach 1995		150 schlecht	Maibach 1995		270 schlecht	Maibach 1995
	kg	5.20 schlecht	Maibach 1995		10.84 schlecht	Maibach 1995		19.51 schlecht	Maibach 1995
	m³	1.00 schlecht	Maibach 1995		2.08 schlecht	Maibach 1995		3.74 schlecht	Maibach 1995
Kohle	kg	1.33 schlecht	Maibach 1995		2.77 schlecht	Maibach 1995		4.99 schlecht	Maibach 1995
Treibstoffe									
	kg	547.5 schlecht	Umfrage		1277.5 schlecht	Umfrage		3577 schlecht	Umfrage
Emissionen Luft									
	kg	215.7 mittel	Ingenieurschule Biel 1995		580 mittel	Ingenieurschule Biel 1995		1447.6 mittel	Ingenieurschule Biel 1995
	kg	0.189 mittel	Ingenieurschule Biel 1995		0.08 mittel	Ingenieurschule Biel 1995		5.81 mittel	Ingenieurschule Biel 1995
	kg	792 mittel	Ingenieurschule Biel 1995		1445 mittel	Ingenieurschule Biel 1995		5534.2 mittel	Ingenieurschule Biel 1995
Transporte									
	tkm	660 schlecht	Maibach 1995		1375 schlecht	Maibach 1995		2475 schlecht	Maibach 1995
	tkm	38.4 schlecht	Maibach 1995		80 schlecht	Maibach 1995		144 schlecht	Maibach 1995
	tkm	7.2 schlecht	Maibach 1995		15 schlecht	Maibach 1995		27 schlecht	Maibach 1995
Abfälle									
	kg	0.5 schlecht	Umfrage		8 schlecht	Umfrage		5 schlecht	Umfrage
Recycling									
Openloop Recycling	kg	47 schlecht	Umfrage		92 schlecht	Umfrage		175 schlecht	Umfrage

Verbrauch auf 100 km (ISB-Studie)

	Motorfahrrad	Motorrad <50m³	Motorrad >50m³
CO	719 g	1160 g	2068 g
NO <sub>x</sub>	0.63 g	0.16 g	8.3 g
CO <sub>2</sub>	2640 g	2890 g	7906 g
Benzin	1.9 l	2.7 l	5.7 l

Verbrauch auf 100 km (ISB-Studie)

	Motorfahrrad	Motorrad <50m <sup>3</sup>	Motorrad >50m <sup>3</sup>
CO	719 g	1160 g	2068 g
NO <sub>x</sub>	0.63 g	0.16 g	8.3 g
CO <sub>2</sub>	2640 g	2890 g	7906 g
Benzin	1.9 l	2.7 l	5.7 l

Tabelle 20: Inputdaten Substitutionsfahrzeuge; motorisierte Zweiräder

Ressourcenbezogener Energiebedarf		Flyer Pb	Flyer NiCd	Velo	Mofa	Roller	Motorrad	PW	Regionalbus	Tram	Regionalzug
Holz	kg	1.88E-05	1.62E-05	7.05E-06	2.94E-05	3.61E-05	5.16E-05	6.76E-05	1.74E-05	6.04E-05	6.56E-05
Pot. Energie Wasser	MJ	0.04	0.04	7.60E-03	0.02	0.04	0.07	0.03	6.64E-03	0.33	0.67
<b>Total erneuerbar</b>	<b>MJ</b>	<b>0.04</b>	<b>0.04</b>	<b>7.75E-03</b>	<b>0.02</b>	<b>0.04</b>	<b>0.07</b>	<b>0.03</b>	<b>6.99E-03</b>	<b>0.33</b>	<b>0.67</b>
Rohbraunkohle	kg	9.16E-04	7.34E-04	2.44E-04	9.31E-04	1.25E-03	2.06E-03	2.35E-03	6.07E-04	3.90E-03	9.69E-04
Rohgas (Erdgas)	m <sup>3</sup>	5.07E-04	3.27E-04	1.56E-04	1.85E-03	2.78E-03	4.97E-03	4.69E-03	1.46E-03	8.81E-04	9.80E-04
Rohsteinkohle	kg	1.85E-03	1.58E-03	6.68E-04	2.65E-03	3.40E-03	4.97E-03	6.14E-03	1.59E-03	6.04E-03	5.85E-03
Rohöl ab Bohrfloch	kg	1.33E-03	9.61E-04	5.97E-04	0.02	0.03	0.06	0.05	0.02	1.74E-03	2.65E-03
Uran ab Erz	g	2.71E-04	2.52E-04	3.23E-05	8.66E-05	1.46E-04	2.45E-04	2.43E-04	5.42E-05	2.56E-03	6.68E-04
<b>Total nicht erneuerbar</b>	<b>MJ</b>	<b>0.25</b>	<b>0.21</b>	<b>0.06</b>	<b>1.19</b>	<b>1.71</b>	<b>3.28</b>	<b>2.71</b>	<b>1.13</b>	<b>1.42</b>	<b>0.58</b>
<b>Gesamttotal</b>	<b>MJ</b>	<b>0.29</b>	<b>0.25</b>	<b>0.07</b>	<b>1.21</b>	<b>1.75</b>	<b>3.36</b>	<b>2.74</b>	<b>1.13</b>	<b>1.75</b>	<b>1.25</b>
<b>Luftemissionen</b>											
Kohlendioxid fossil (CO <sub>2</sub> )	g	9.02	6.88	3.45	48.90	61.40	137.00	176.00	74.60	20.50	20.80
Kohlenmonoxid (CO)	g	0.02	0.02	0.01	7.24	11.70	20.70	4.10	0.37	0.01	0.08
Lachgas (N <sub>2</sub> O)	g	8.08E-05	5.49E-05	2.64E-05	5.68E-03	7.97E-03	0.02	0.02	1.38E-03	1.96E-04	1.16E-04
Methan (CH <sub>4</sub> )	g	0.02	0.02	7.81E-03	0.12	0.16	0.31	0.34	0.10	0.05	0.06
NM VOC Nicht-Methan KW	g	0.02	0.01	0.01	0.54	0.76	1.50	1.85	0.29	0.02	0.03
Radioaktive Substanzen	kBq	23.50	21.90	2.79	7.51	12.60	21.10	21.10	4.70	223.00	58.00
Schwefeloxide (SO <sub>x</sub> ) als SO <sub>2</sub>	g	0.05	0.13	0.01	0.15	0.23	0.43	0.34	0.11	0.11	0.01
Staub/Partikel	g	0.01	0.01	4.10E-03	0.02	0.04	0.07	0.05	0.06	0.02	0.02
Stickoxide (NO <sub>x</sub> ) als NO <sub>2</sub>	g	0.02	0.01	6.47E-03	0.08	0.12	0.29	0.82	1.00	0.04	0.04

Tabelle 21: zusammengefasste Resultatetabelle

Energiebedarf		Flyer Pb	Flyer NiCd	Velo	Mofa	Roller	Motorrad	PW	Regionalbus	Tram	Regionalzug	Einsparung
Holz	kg	1,88E-05	1,62E-05	7,05E-06	2,94E-05	3,61E-05	5,16E-05	6,76E-05	1,74E-05	6,04E-05	6,56E-05	1,72E-05
Pot. Energie Wasser	MJ	0,04	0,04	7,60E-03	0,02	0,04	0,07	0,03	6,64E-03	0,33	0,67	0,04
<b>Total erneuerbar</b>	<b>MJ</b>	<b>0,04</b>	<b>0,04</b>	<b>7,75E-03</b>	<b>0,02</b>	<b>0,04</b>	<b>0,07</b>	<b>0,03</b>	<b>6,99E-03</b>	<b>0,33</b>	<b>0,67</b>	<b>0,04</b>
Rohbraunkohle	kg	9,16E-04	7,34E-04	2,44E-04	9,31E-04	1,25E-03	2,06E-03	2,35E-03	6,07E-04	3,90E-03	9,66E-04	3,41E-04
Rohgas (Erdgas)	m <sup>3</sup>	5,07E-04	3,27E-04	1,56E-04	1,85E-03	2,78E-03	4,97E-03	4,69E-03	1,46E-03	8,81E-04	9,80E-04	1,56E-03
Rohsteinkohle	kg	1,85E-03	1,58E-03	6,68E-04	2,65E-03	3,40E-03	4,97E-03	6,14E-03	1,59E-03	6,04E-03	5,85E-03	1,46E-03
Rohöl ab Bohrloch	kg	1,33E-03	9,61E-04	5,97E-04	0,02	0,03	0,06	0,05	0,02	1,74E-03	2,65E-03	0,02
Uran ab Erz	g	2,71E-04	2,52E-04	3,23E-05	8,66E-05	1,46E-04	2,45E-04	2,43E-04	5,42E-05	2,56E-03	6,68E-04	1,79E-05
<b>Total nicht erneuerbar</b>	<b>MJ</b>	<b>0,25</b>	<b>0,21</b>	<b>0,06</b>	<b>1,19</b>	<b>1,71</b>	<b>3,28</b>	<b>2,71</b>	<b>1,13</b>	<b>1,42</b>	<b>0,58</b>	<b>1,05</b>
<b>Gesamttotal</b>	<b>MJ</b>	<b>0,29</b>	<b>0,25</b>	<b>0,07</b>	<b>1,21</b>	<b>1,75</b>	<b>3,36</b>	<b>2,74</b>	<b>1,13</b>	<b>1,75</b>	<b>1,25</b>	<b>1,09</b>
Luftemissionen												
Kohlendioxid fossil (GO <sub>2</sub> )	g	9,02	6,88	3,45	48,90	61,40	137,00	176,00	74,60	20,50	20,80	63,61
Kohlenmonoxid (CO)	g	0,02	0,02	0,01	7,24	11,70	20,70	4,10	0,37	0,01	0,08	2,86
Lachgas (N <sub>2</sub> O)	g	8,08E-05	5,49E-05	2,64E-05	5,68E-03	7,97E-03	0,02	0,02	1,38E-03	1,96E-04	1,16E-04	7,93E-03
Methan (CH <sub>4</sub> )	g	0,02	0,02	7,81E-03	0,12	0,16	0,31	0,34	0,10	0,05	0,06	0,12
NMVOG	g	0,02	0,01	0,01	0,54	0,76	1,50	1,85	0,29	0,02	0,03	0,66
Radioaktive Substanzen	kBq	23,50	21,90	2,79	7,51	12,60	21,10	21,10	4,70	223,00	58,00	1,58
Schwefeloxide (SO <sub>x</sub> ) als SO <sub>2</sub>	g	0,05	0,13	0,01	0,15	0,23	0,43	0,34	0,11	0,11	0,01	0,11
Staub/Partikel	g	0,01	0,01	4,10E-03	0,02	0,04	0,07	0,05	0,06	0,02	0,02	0,02
Stickoxide (NO <sub>x</sub> ) als NO <sub>2</sub>	g	0,02	0,01	6,47E-03	0,08	0,12	0,29	0,82	1,00	0,04	0,04	0,36

Tabelle 22: Energiebedarf und Einsparungen bei 53 eingesetzten FLYERN

Energiebedarf		ohne Flyer		mit Flyer		Einsparungen		53 Flyer à 40'000 km	pro Flyer und Jahr (2'000 km)	pro Personen-kilometer
						Energiebedarf				
Holz	kg	3,60E-05		1,88E-05			kg	36,42	0,03	1,72E-05
Pot. Energie Wasser	MJ	0,08		0,04			MJ	8,99E+04	84,83	0,04
<b>Total erneuerbar</b>	<b>MJ</b>	<b>0,08</b>		<b>0,04</b>			<b>MJ</b>	<b>9,06E+04</b>	<b>85,45</b>	<b>0,04</b>
Rohbraunkohle	kg	1,26E-03		9,16E-04			kg	723,68	0,68	3,41E-04
Rohgas (Erdgas)	m³	2,07E-03		5,07E-04			m³	3307,86	3,12	1,56E-03
Rohsteinkohle	kg	3,31E-03		1,85E-03			kg	3098,44	2,92	1,46E-03
Rohöl ab Bohrloch	kg	0,02		1,33E-03			kg	4,42E+04	41,71	0,02
Uran ab Erz	kg	2,89E-04		2,71E-04			kg	38,01	0,04	1,79E-05
<b>Total nicht erneuerbar</b>	<b>MJ</b>	<b>1,30</b>		<b>0,25</b>			<b>MJ</b>	<b>2,22E+06</b>	<b>2092,58</b>	<b>1,05</b>
<b>Gesamttotal</b>	<b>MJ</b>	<b>1,38</b>		<b>0,29</b>			<b>MJ</b>	<b>2,31E+06</b>	<b>2176,34</b>	<b>1,09</b>
Fossile Energieträger		0,03		4,60E-03						
<b>Luftemissionen</b>										
Kohlendioxid fossil (CO <sub>2</sub> )	g	72,63		9,02			g	1,35E+08	1,27E+05	63,61
Kohlenmonoxid (CO)	g	2,88		0,02			g	6,06E+06	5715,98	2,86
Lachgas (N <sub>2</sub> O)	g	8,02E-03		8,08E-05			g	1,68E+04	15,87	7,93E-03
Methan (CH <sub>4</sub> )	g	0,14		0,02			g	2,58E+05	243,82	0,12
NM VOC	g	0,68		0,02			g	1,40E+06	1320,79	0,66
Radioaktive Substanzen	kBq	25,08		23,50			kBq	3,36E+06	3166,92	1,58
Schwefeloxide (SO <sub>x</sub> ) als SO <sub>2</sub>	g	0,16		0,05			g	2,30E+05	217,10	0,11
Staub/Partikel	g	0,03		0,01			g	4,08E+04	38,45	0,02
Stickoxide (NO <sub>x</sub> ) als NO <sub>2</sub>	g	0,38		0,02			g	7,71E+05	727,54	0,36

Tabelle 22: Energiebedarf und Einsparungen bei 53 eingesetzten FLYERN



		Flyer Pb	Flyer NiCd	Velo	Mofa	Roller	Motorrad	PW	Regionalbus	Tram	Regionalzug	Einsparungen
Energiebedarf												
Holz	kg	1,88E-05	1,62E-05	7,05E-06	2,94E-05	3,61E-05	5,16E-05	6,76E-05	1,74E-05	6,04E-05	6,56E-05	2,01E-05
Pot. Energie Wasser	MJ	0,04	0,04	7,60E-03	0,02	0,04	0,07	0,03	6,64E-03	0,33	0,67	0,06
Total erneuerbar	MJ	0,04	0,04	7,75E-03	0,02	0,04	0,07	0,03	6,99E-03	0,33	0,67	0,06
Rohbraunkohle	kg	9,16E-04	7,34E-04	2,44E-04	9,31E-04	1,25E-03	2,06E-03	2,35E-03	6,07E-04	3,90E-03	9,66E-04	5,59E-04
Rohgas (Erdgas)	m³	5,07E-04	3,27E-04	1,56E-04	1,85E-03	2,78E-03	4,97E-03	4,69E-03	1,46E-03	8,81E-04	9,80E-04	1,67E-03
Rohsteinkohle	kg	1,85E-03	1,58E-03	6,68E-04	2,65E-03	3,40E-03	4,97E-03	6,14E-03	1,59E-03	6,04E-03	5,85E-03	1,79E-03
Rohöl ab Bohrloch	kg	1,33E-03	9,61E-04	5,97E-04	0,02	0,03	0,06	0,05	0,02	1,74E-03	2,65E-03	0,02
Uran ab Erz	g	2,71E-04	2,52E-04	3,23E-05	8,66E-05	1,46E-04	2,45E-04	2,43E-04	5,42E-05	2,56E-03	6,68E-04	8,25E-05
Total nicht erneuerbar	MJ	0,25	0,21	0,06	1,19	1,71	3,28	2,71	1,13	1,42	0,58	1,06
Gesamttotal	MJ	0,29	0,25	0,07	1,21	1,75	3,36	2,74	1,13	1,75	1,25	1,11
Luftemissionen												
Kohlendioxid fossil (CO <sub>2</sub> )	g	9,02	6,88	3,45	48,9	61,4	137	176	74,6	20,5	20,8	60,80
Kohlenmonoxid (CO)	g	0,02	0,02	0,01	7,24	11,70	20,70	4,10	0,37	0,01	0,08	3,08
Lachgas (N <sub>2</sub> O)	g	8,08E-05	5,49E-05	2,64E-05	5,68E-03	7,97E-03	0,02	0,02	1,38E-03	1,96E-04	1,16E-04	7,43E-03
Methan (CH <sub>4</sub> )	g	0,02	0,02	0,01	0,12	0,16	0,31	0,34	0,10	0,05	0,06	0,12
NMVOG	g	0,02	0,01	0,01	0,54	0,76	1,50	1,85	0,29	0,02	0,03	0,62
Radioaktive Substanzen	kBq	23,50	21,90	2,79	7,51	12,60	21,10	21,10	4,70	223,00	58,00	7,14
Schwefeloxide (SO <sub>x</sub> ) als SO <sub>2</sub>	g	0,05	0,13	0,01	0,15	0,23	0,43	0,34	0,11	0,11	0,01	0,02
Staub / Partikel	g	0,01	0,01	0,00	0,02	0,04	0,07	0,05	0,06	0,02	0,02	0,02
Stickoxide (NO <sub>x</sub> ) als NO <sub>2</sub>	g	0,02	0,01	0,01	0,08	0,12	0,29	0,82	1,00	0,04	0,04	0,32

Tabelle 23: Energiebedarf und Einsparungen im Jahr 2003

		mit Flyer NiCd		ohne Flyer	
Energiebedarf					
Holz	kg	1,62E-05	3,63E-05		
Pot. Energie Wasser	MJ	0,04	0,09		
Total erneuerbar	MJ	0,04	0,09		
Rohbraunkohle	kg	7,34E-04	1,29E-03		
Rohgas (Erdgas)	m <sup>3</sup>	3,27E-04	2,00E-03		
Rohsteinkohle	kg	1,58E-03	3,36E-03		
Rohöl ab Bohrloch	kg	9,61E-04	0,02		
Uran ab Erz	g	2,52E-04	3,34E-04		
Total nicht erneuerbar	MJ	0,21	1,27		
Gesamttotal	MJ	0,25	1,36		
Luftemissionen					
Kohlendioxid fossil (CO <sub>2</sub> )	g	6,88	67,68		
Kohlenmonoxid (CO)	g	0,02	3,10		
Lachgas (N <sub>2</sub> O)	g	5,49E-05	7,48E-03		
Methan (CH <sub>4</sub> )	g	0,02	0,14		
NM VOC	g	0,01	0,64		
Radioaktive Substanzen	kBq	21,90	29,04		
Schwefeloxide (SO <sub>x</sub> ) als SO <sub>2</sub>	g	0,13	0,15		
Staub / Partikel	g	0,01	0,03		
Stickoxide (NO <sub>x</sub> ) als NO <sub>2</sub>	g	0,01	0,34		

Einsparungen		10'000 Flyer à 40'000 km	pro Flyer und Jahr (2'000 km)	pro Personen-kilometer
Energiebedarf				
Holz	kg	8,05E+03	0,04	2,01E-05
Pot. Energie Wasser	MJ	2,21E+07	110,32	0,06
Total erneuerbar	MJ	2,22E+07	111,10	0,06
Rohbraunkohle	kg	2,23E+05	1,12	5,59E-04
Rohgas (Erdgas)	m <sup>3</sup>	6,67E+05	3,34	1,67E-03
Rohsteinkohle	kg	7,14E+05	3,57	1,79E-03
Rohöl ab Bohrloch	kg	8,05E+06	40,24	0,02
Uran ab Erz	g	3,30E+04	0,17	8,25E-05
Total nicht erneuerbar	MJ	4,24E+08	2,117,85	1,06
Gesamttotal	MJ	4,46E+08	2,227,80	1,11
Luftemissionen				
Kohlendioxid fossil (CO <sub>2</sub> )	g	2,43E+10	1,22E+05	60,80
Kohlenmonoxid (CO)	g	1,23E+09	6,16E+03	3,08
Lachgas (N <sub>2</sub> O)	g	2,97E+06	14,86	7,43E-03
Methan (CH <sub>4</sub> )	g	4,78E+07	239,00	0,12
NM VOC	g	2,49E+08	1,24E+03	0,62
Radioaktive Substanzen	kBq	2,86E+09	1,43E+04	7,14
Schwefeloxide (SO <sub>x</sub> ) als SO <sub>2</sub>	g	8,93E+06	44,65	0,02
Staub / Partikel	g	7,22E+06	36,11	0,02
Stickoxide (NO <sub>x</sub> ) als NO <sub>2</sub>	g	1,29E+08	643,28	0,32

Tabelle 23: Energiebedarf und Einsparungen im Jahr 2003