

# Systemvergleich Trolley-, Diesel- und (Bio-)Gasbus

Studie für die Buslinie 4 in Winterthur  
18. Dezember 2002





## **Vorwort**

Die Winterthurer Verkehrsbetriebe stehen vor einer Erneuerung ihrer Busflotte. Es stellt sich die Frage, ob im Zuge dieser Beschaffung auch Busse für die Linie 4 (Hauptbahnhof - Breite) in Auftrag gegeben werden sollen. Auf dieser Linie 4 haben bis vor 5 Jahren Trolleybusse verkehrt, die dann durch Dieselbusse ersetzt worden sind. Die bestehende Fahrleitung auf dem 4.7 km langen Rundkurs müsste für den erneuten Einsatz von Trolleybussen komplett überholt werden. Die jüngste Entwicklung in Europa zeigt, dass der Einsatz von gasbetriebenen Bussen zunimmt. Im Rahmen des Programmes EnergieSchweiz nimmt die Förderung erneuerbarer Energien einen wichtigen Stellenwert ein. Die Verwertung von Biogas als Treibstoff stellt dabei eine vielversprechende Option dar.

Ob künftig auf der Linie 4 mit Strom, Diesel oder Biogas gefahren wird, ist Gegenstand dieser Analyse. Sie untersucht vergleichend Wirtschaftlichkeit und ökologische Auswirkungen der drei Varianten und erläutert weitere Entscheidungskriterien. Die Studie richtet sich an die politische Behörde und Interessierte dieses Themenkreises.

Die Verfasser der Studie möchten den Winterthurer Verkehrsbetrieben für die wertvolle Zusammenarbeit und die tatkräftige Unterstützung in der Erarbeitung dieser Entscheidungsgrundlagen herzlich danken.



## Zusammenfassung

### Ausgangslage

Die Verkehrsbetriebe Winterthur stehen vor der Entscheidung, was für Busse in Zukunft auf der Linie 4 (Rundkurs Hauptbahnhof - Breite) verkehren werden. Sollen weiterhin Dieselbusse zum Einsatz kommen, sollen wieder wie noch vor fünf Jahren - Trolleybusse verkehren oder soll konsequent auf erneuerbare Energien gesetzt werden, indem CO<sub>2</sub>-neutrales Biogas als Treibstoff gewählt wird? Als Grundlage für diesen Entscheid werden im vorliegenden Bericht die drei Antriebsvarianten in ökonomischer und ökologischer Hinsicht verglichen.

Busse für die Linie 4

### Die Varianten

Die wichtigsten Merkmale der drei Varianten sind folgende:

- **Variante „Trolley“:** Trolleybusse fahren mit Strom und verursachen dadurch keine direkten Schadstoffemissionen. Für die Stromversorgung benötigen sie ein Fahrleitungsnetz. Wegen der fortschreitenden Strommarktöffnung wird den Berechnungen der europäische Mix für die Stromproduktion zugrunde gelegt, welcher zu fast 50% aus fossilen Energieträgern (Kohle, Erdöl und Erdgas) produziert wird.
- **Variante „Diesel“:** Die Dieselbusse fahren mit nahezu schwefelfreiem „Greendiesel“ und können auf dem gesamten Strassennetz eingesetzt werden. Die Busse sind mit modernen Filtern (CRT-Filter) ausgerüstet und halten bezüglich Abgase die derzeit gültige EURO3-Norm ein.
- **Variante „Biogas“:** In dieser Studie wird ein mit Biogas betriebener Gasbus bilanziert. Durch die Vergärung von biogenen Abfällen wird rohes Biogas (Rohgas) gewonnen, welches als Rohstoff zur Verfügung steht. Dieses Rohgas muss für den Einsatz als Antriebsmittel zu Biogas mit Erdgas-Qualität (Reingas) aufbereitet werden. Biogas ist CO<sub>2</sub>-neutral und kann aus Winterthurer Biomasse (biogenen Abfällen) hergestellt werden. Gasbusse können auf dem gesamten Strassennetz verkehren. Die Berechnungen basieren auf eher konservativen Annahmen zur Biogas-Herstellung, z.B. werden keine Gutschriften für den Ersatz anderer Entsorgungswege gemacht.

### Beurteilung der Umweltwirkung

Die Umweltbelastungen der drei Varianten „Trolley“, „Diesel“ und „Biogas“ werden durch eine Ökobilanzierung gemäss ISO-Norm 14'040 abgeschätzt. Es werden je drei verschiedene Ökobilanzmethoden angewandt. Die Methode der Ökologischen Knappheit 1997 basiert auf einem Vergleich der verursachten Stoffströme mit den politischen Zielen und wird in

Drei Methoden für die Ökobilanzierung

Umweltbelastungspunkten (UBP) ausgedrückt. Die beiden wirkungsorientierten Methoden Eco-Indicator 99 und CML 1992 beurteilen den Beitrag zu den einzelnen Umweltproblemen und deren Auswirkungen auf die Gesundheit des Menschen und den Lebensraum.

Vorgehen	Mit der Ökobilanz wird nachgewiesen, welches Antriebssystem – Strom, Diesel oder Biogas – für die Buslinie 4 in Winterthur die geringsten Umweltbelastungen verursacht. Die quantifizierten Umweltauswirkungen fließen anschliessend in die Öko-Effizienz-Betrachtungen ein, welche die wirtschaftliche Seite einbeziehen und so eine Gesamtbeurteilung erlauben.
Festlegung der betrachteten Prozesse	In dieser Studie werden nur Prozesse betrachtet, in welchen sich Diesel-, Gas- und Trolleybusse wesentlich unterscheiden. Diese sind die Herstellung der Antriebsmittel und der Betrieb der Busse.
Gasbus deutlich besser als Diesel- und Trolleybus	Die Auswertungen nach den drei Ökobilanz-Methoden deuten übereinstimmend auf eine deutlich kleinere Umweltbelastung durch die Variante Biogas. Welche der anderen zwei Varianten besser ist, lässt sich nicht eindeutig ablesen. Die beiden Methoden Eco-Indicator 99 und CML 1992 beruhen auf einem ähnlichen Ansatz und zeigen beide eine stärkere Umweltbelastung durch die Variante Diesel. Diese Aussage wird aber durch die Methode Ökologische Knappheit 1997 nicht unterstützt.
Alternativ-Varianten wegen entscheidendem Einfluss der Antriebsmittel	<p>Wegen des grossen Einflusses der ökologischen Qualität der Antriebsmittel werden beim Gas- beziehungsweise Trolleybus je eine Alternative-Variante mit anderen Antriebsmitteln sowie eine alternative, kurzfristige Situation des Biogasmarktes (mit Gutschriften für den Ersatz bisher betriebener Entsorgungswege) untersucht. Es sind dies die Alternativ-Varianten</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• „Trolleybus – Wasserkraft“,</li> <li>• „Gasbus – Erdgas“ und</li> <li>• „Biogas 2002“.</li> </ul> <p>Die Auswertung dieser Analyse ergeben eine sehr gute Bewertung des mit im heutigen Biogasmarkt verfügbaren Biogas betriebenen Busses und zeigen, dass beim Trolleybus die Wahl des Stromprodukts für die Umweltauswirkungen entscheidend ist. Mit Strom aus Wasserkraft erreicht der Trolleybus ähnliche Resultate wie der Biogasbus.</p>

### Kosten

Zusammensetzung der Kosten	In die Kostenbetrachtung fliessen die fixen Betriebskosten (Gebäudeunterhalt, Infrastruktur Werkstatt, Depot- und Personalkosten Technik), die variablen Betriebskosten (Treibstoffkosten, Versicherungen, Bereifung, Schmierstoffe, Ersatzteile und variable Personalkosten Technik), die Personalkosten Chauffeure (inklusive Sozialleistungen) und die Investitionskosten (Busse, Fahrleitungen und Gastankstelle) ein.
----------------------------	--

Die Personalkosten für die Fahrer sind der grösste Kostenblock und bei allen Varianten identisch. Die fixen Betriebskosten sowie die Investitionskosten sind beim Trolleybus am höchsten, der Gasbus hat die höchsten variablen Betriebskosten. Insgesamt generiert die Trolleyvariante Mehrkosten gegenüber dem Diesel von knapp CHF 300'000.- pro Jahr oder 24%. Umgerechnet sind das CHF 1.76 pro gefahrenem Kilometer. Die Gasvariante ist gegenüber dem Dieselbus 4% teurer. Dies entspricht Mehrkosten von gut CHF 49'000.- pro Jahr oder CHF 0.30 pro Kilometer.

Trolleybus 24% teurer

Die untersuchten Alternativ-Varianten: Betrieb des Gasbusses mit Erdgas, Verwendung von Wasserkraftstrom für den Trolleybus sowie die Berücksichtigung der kurzfristigen Situation des Biogasmarktes zeigen keinen nennenswerten Veränderung der Kostensituation im Vergleich zu ihren Grundvarianten.

Sensitivitätsanalysen basierend auf der Einführung der CO<sub>2</sub>-Steuer, der Reduktion des Strompreises aufgrund der Strommarkliberalisierung und der Abschreibungen aller Investitionen über den Betrachtungszeitraum von 12 Jahren zeigen, dass das erhaltene Resultat durch keine der genannten Variablenveränderung stark beeinflusst wird. Der Trolleybus bleibt in allen Szenarien zwischen 22 und 30 % teurer, der Gasbus 3-4%.

Kosten reagieren kaum auf Veränderung der Variablen

## Vergleich von Kosten und Umweltwirkungen

Eine Gegenüberstellung von ökonomischen und ökologischen Auswirkungen ergibt folgendes Bild.

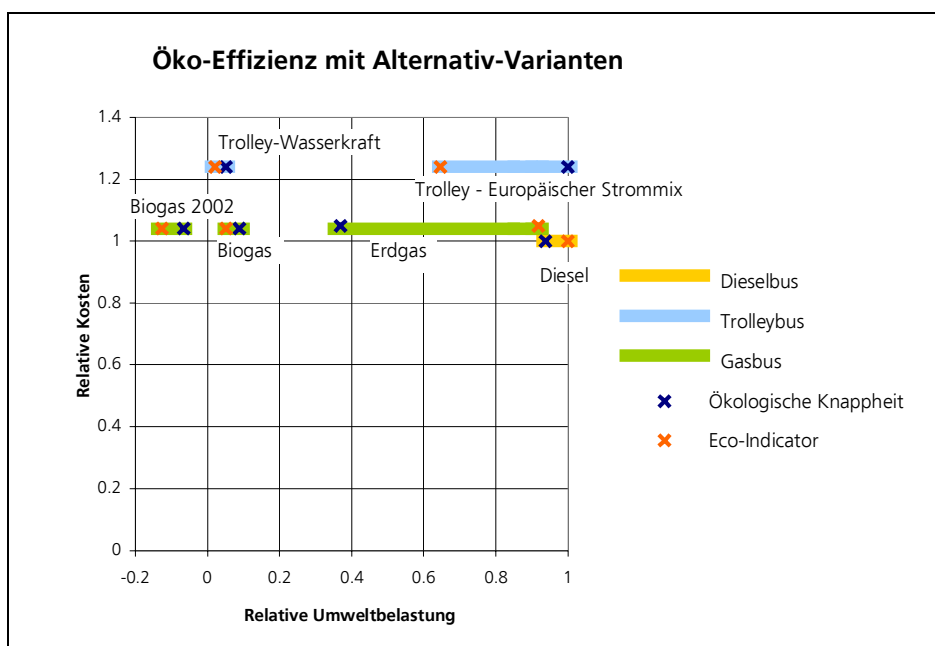


Abbildung 1:  
Kosten- Wirksamkeit  
(Öko-Effizienz)

Aus der Grafik geht hervor, dass der mit Biogas betriebene Gasbus (Biogas) gegenüber dem Dieselbus eine um 80-95% geringere Umweltverschmutzung

Der Biogas-Bus hat die beste  
Öko-Effizienz

zung bei sehr geringen Mehrkosten erreicht. Ein mit Strom aus Wasserkraft betriebener Trolleybus ist bei gleicher Umweltbelastung etwa 20% teurer als ein mit Biogas betriebener Gasbus.

### **Schlussfolgerungen**

Aus dem Vergleich der Varianten bezüglich Kosten, ökologischen Auswirkungen und weiteren Beurteilungskriterien können folgende Hauptaussagen gemacht werden:

- Die kostengünstigste Variante ist der Dieselbus. Er schneidet in der ökologischen Betrachtung jedoch schlecht ab.
- Ein mit Biogas betriebener Gasbus schneidet aus ökologischer Sicht sehr gut ab und ist nur unwesentlich teurer als ein Dieselbus (4%). Er weist damit die beste Öko-Effizienz auf. Wenn das Biogas aus Winterthurer Biomasse gewonnen wird, werden Stoffkreisläufe auf anschauliche Weise geschlossen. Dies bietet den Verkehrsbetrieben und der Stadt die Chance, einen zukunftsgerichteten, ökologischen Schritt zu tun, der das Image der Stadt positiv prägt. Ein heute mit Biogas betriebener Gasbus (Biogas 2002) erreicht dank der Auswirkungen auf die Grüngut-Entsorgungssituation sogar eine positive Umweltbilanz.
- Ein mit Erdgas betriebener Gasbus ist etwa gleich teuer wie der mit Biogas betriebene Gasbus, schneidet aber auf der Umweltseite weniger gut ab.
- Ein Trolleybus ist mit Mehrkosten von ca. 24% wesentlich teurer als ein Dieselbus. Der Trolleybus verursacht beim Betrieb keine direkten Schadstoffmissionen und wird deshalb bei einer rein lokalen Sichtweise gegenüber dem Dieselbus bevorzugt. Eine solche „lokal-ökologische“ Sicht ist heute jedoch kaum mehr vertretbar.
- Die globalen Umweltauswirkungen des Trolleybusses sind stark abhängig von der Wahl des Stromprodukts. Unabhängig davon betragen die Mehrkosten gegenüber dem Dieselbus ca. 24%. Wird europäischer Strom gekauft, sind die ökologischen Auswirkungen nicht eindeutig besser als bei einem Dieselbus, was die Mehrkosten nicht rechtfertigt. Wird der Trolleybus hingegen mit Schweizer Wasserkraft-Strom betrieben, so schneidet er aus ökologischer Sicht sehr gut ab und kann so für die Mehrkosten klare Umweltvorteile aufweisen.
- Es ist betriebswirtschaftlich sinnvoll, eine möglichst homogene Fahrzeugflotte mit möglichst ähnlicher Antriebstechnologie anzustreben.

Aus den oben stehenden Aussagen können folgende Empfehlungen abgeleitet werden:

Der Einsatz von Gasbussen ist sowohl aus ökologischer als auch ökonomischer Sicht sehr empfehlenswert, besonders wenn sie mit Biogas betrieben



werden. Die Vergärung von biogenen Abfällen ist eine zukunftsfähige Technologie zur Gewinnung erneuerbarer Energie und zur Schliessung lokaler Stoffkreisläufe. Der Einsatz von Gasbussen bietet der Stadt Winterthur eine gute Gelegenheit, ihr Engagement für nachhaltige Lösungen weiterzuführen.

Der Einsatz von Trolleybussen sollte zwingend mit der Verwendung von Wasserkraft-Strom (oder anderer erneuerbarer Energie) gekoppelt werden. Angetrieben durch Strom aus Wasserkraft stehen den 24% jährlichen Mehrkosten gegenüber dem Dieselbus eine bedeutende Reduktion der Umweltbelastung gegenüber. Gegenüber dem Gasbus besteht der Vorteil, dass keine neue Antriebstechnologie eingesetzt werden muss.



## Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung .....	1
1.1	Ausgangslage .....	1
1.2	Zielsetzung .....	1
2	Vorgehen und Methodik .....	1
2.1	Vorgehen .....	1
2.2	Angewandte Methoden .....	2
2.2.1	Umwelt.....	2
2.2.2	Wirtschaftlichkeit.....	4
2.2.3	Zusammenführen von Wirtschafts- und Umweltbetrachtung .....	4
3	Systemgrenzen .....	5
3.1	Beschrieb der Linie 4 und der Antriebsvarianten .....	5
3.2	Prozesse Umwelt.....	6
3.3	Prozesse Kosten .....	7
3.4	Weitere wichtige Annahmen .....	7
4	Beschreibung der Varianten.....	8
4.1	Umwelt .....	8
4.2	Kosten.....	10
5	Umweltauswirkungen .....	13
5.1	Sachbilanz .....	13
5.2	Wirkungsbilanz .....	15
5.3	Alternativ-Varianten Ökologie.....	19
6	Wirtschaftlichkeit .....	21
6.1	Die Wirtschaftlichkeit der Grundvarianten .....	21
6.2	Wirtschaftlichkeit der Alternativ-Varianten .....	24
6.3	Sensitivitätsanalyse Wirtschaftlichkeit.....	25
7	Vergleich Umweltbelastung – Kosten.....	27
7.1	Öko-Effizienz der Grundvarianten .....	27
7.2	Öko-Effizienz der Alternativ-Varianten .....	28
7.3	Sensitivitäten .....	28
7.4	Öko-Effizienz im nationalen und internationalen Vergleich ....	29
8	Weitere Beurteilungskriterien.....	30
9	Schlussfolgerungen und Empfehlung .....	32



# 1 Einleitung

## 1.1 Ausgangslage

Die Verkehrsbetriebe Winterthur stehen vor der Entscheidung, ob auf der Linie 4 (Rundkurs Hauptbahnhof - Breite) weiterhin Dieselbusse zum Einsatz kommen, ob wieder - wie noch vor fünf Jahren - Trolleybusse verkehren sollen oder ob gasgetriebene Busse unter wirtschaftlichen und ökologischen Kriterien die optimale Variante darstellen. Unabhängig von der Antriebsvariante müssten zwei 2-Achs-Busse und die entsprechende Infrastruktur bis im Jahr 2005 bereitstehen. Damit die Bestellung der Busse im Jahr 2004 getätigt werden kann, muss die zuständige Behörde darüber entscheiden, welches der drei Antriebskonzepte die beste Alternative darstellt.

Neue Busse im Jahr 2004

Ernst Basler + Partner AG hat 1995 einen ähnlichen Systemvergleich (Ökonomie/Ökologie) der Antriebssysteme Dieselbus, Gasbus und Trolleybus für die Stadt Winterthur auf derselben Linie 4 durchgeführt [1]. Seither hat sich die Technologie des Gas- und des Dieselantriebs verändert und das Wissen um die ökologischen Zusammenhänge verbessert. Diesen Tatsachen soll mit dieser neuen Studie Rechnung getragen werden.

## 1.2 Zielsetzung

In der Studie werden die drei Antriebssysteme in ökonomischer und ökologischer Hinsicht miteinander verglichen. Dabei werden insbesondere die Umweltbelastungen und die Kosten einander gegenübergestellt. Zudem werden weitere Kriterien (u.a. Elektrosmog, Lärm) qualitativ in die Beurteilung mit einbezogen. Der Bericht stellt die sachlichen Entscheidungsgrundlagen dar und formuliert daraus Empfehlungen zuhanden der Entscheidungsbehörde.

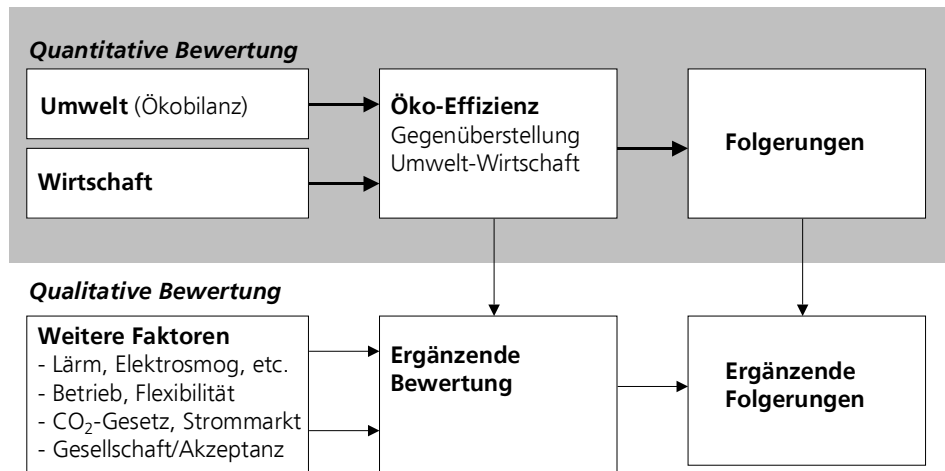
Vergleich von Trolley- Diesel- und Gasbussen

# 2 Vorgehen und Methodik

## 2.1 Vorgehen

In der untenstehenden Abbildung ist anhand der verschiedenen Projektschritte das Vorgehen schematisch aufgezeichnet. Die quantitative Bewertung wird dazu durch qualitative Faktoren ergänzt.

Abbildung 2:  
Methodik zur Bewertung der  
Systemvarianten Trolley-, Diesel-  
und Gasbus



#### 1. Schritt: Systemabgrenzungen

In einem ersten Schritt werden für die drei Antriebsvarianten Trolley-, Diesel- und Gasbus die Systemabgrenzungen vorgenommen. Dabei wird definiert, welche Kosten und insbesondere welche Verfahren zur Bewertung der Umweltbelastungen zugelassen werden sollen. Dazu gehört auch die Definition der Parameter für die drei Varianten und die Bestimmung von Variablen, die einer Sensitivitätsanalyse unterzogen werden sollen.

#### 2. Schritt: Ermitteln von Kosten und Umweltbelastung

In der zweiten Phase werden die entsprechenden Kosten und Umweltbelastungen der Varianten ermittelt und verifiziert. Weiter werden diese Ergebnisse mit Hilfe von Sensitivitätsanalysen auf ihre Stabilität geprüft.

#### 3. Schritt: Öko-Effizienz

Die in diesem zweiten Schritt ermittelten quantitativen Werte der Ökobilanz und der Wirtschaftlichkeitsrechnung werden einander in einer Öko-Effizienzdarstellung gegenübergestellt. Daraus kann eine Rangierung der Antriebsvarianten bezüglich Kosten und Umweltauswirkungen abgeleitet werden.

#### 4. Schritt: Qualitative Kriterien und Schlussfolgerungen

In einem weiteren Schritt werden nicht mit der Ökobilanz bewertbare Umweltbelastungen (z.B. Lärm, Elektromog) und weitere qualitative Kriterien (Flexibilität im täglichen Betrieb, Handlungsfreiheit für Systementwicklung in Zukunft, Image der Stadt usw.) einbezogen und daraus Schlussfolgerungen hergeleitet.

## 2.2 Angewandte Methoden

### 2.2.1 Umwelt

Ökobilanzierung gemäss  
ISO-Norm 14'040

Die Methodik der Ökobilanzierung für den Vergleich der beiden Antriebsvarianten aus Sicht Ökologie erfolgt gemäss der ISO-Norm 14'040 (vgl. Abbildung 3), wobei die Bilanzierung in vier Phasen durchgeführt wird [2]:

- Festlegen des Untersuchungsrahmens
- Festlegen der Prozesse

- Sachbilanzierung
- Wirkungsanalyse und Bewertung der Umweltauswirkungen

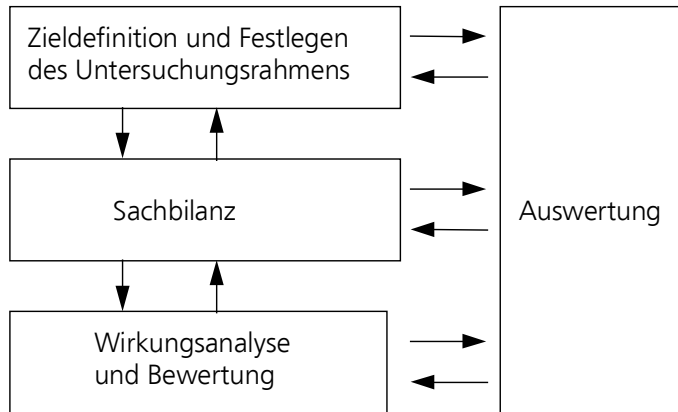


Abbildung 3:  
Phasen der Ökobilanzierung  
gemäss ISO 14'040

Mit der vorliegenden Ökobilanz ist zu untersuchen, welches Antriebssystem – Diesel, Gas oder Strom – für die Winterthurer Buslinie 4 kleinere Umweltbelastungen verursacht. Als Grundlage für die Quantifizierung der Umweltauswirkungen muss das System definiert und der zeitliche und räumliche Untersuchungsrahmen festgelegt werden.

Festlegen des  
Untersuchungsrahmens

In einem ersten Schritt werden die drei zu vergleichenden Antriebsvarianten im Detail beschrieben. Dabei werden die umweltrelevanten Prozesse festgesetzt und die entsprechenden Material- und Energieflüsse erhoben. Die Bestimmung der umweltrelevanten Stoffe und deren Verbindung mit den entsprechenden Ökoinventaren erfolgt vor der Erfassung der Inputdaten in die Ökobilanz-Software.

Festlegung der Prozesse

Die Sachbilanz kann für alle Umweltbereiche (Luft, Wasser, Boden, Deponieraum, Ressourcenverbrauch) mit Hilfe einer Ökobilanz-Software<sup>1)</sup> mit quantitativen Daten erstellt werden. Für die Umweltbereiche Flächenbedarf und Lärm kann mangels Grundlagedaten keine Bilanz erstellt werden.

Sachbilanz

Für die Wirkungsabschätzung der Umweltbereiche, insbesondere der Luft, werden drei verschiedene Ökobilanzmethoden verwendet: Mit der Methode der Ökologischen Knappheit 1997 (UBP 97) werden die Auswirkungen in Umweltbelastungspunkten (UBP) dargestellt [4]. Mit Hilfe der Methode ‚Eco-Indicator 99‘ [5] und der CML-Methode (CML 92) [6] werden diese Resultate verifiziert. Die Zuordnung der Ökofaktoren zu den Ökoinventaren basiert auf der Arbeitshilfe der ÖBU für die Ökobilanzierung in der Praxis [7].

Wirkungsbilanz und Bewertung

Die Anwendung von drei Ökobilanzmethoden erhöht die Aussagekraft und die Stabilität der Resultate. Methoden und Ansätze sind im Anhang A1 beschrieben und werden in Tabelle 1 kurz charakterisiert.

Methoden von quantitativen  
Ökobilanzen

Tabelle 1:  
Beschreibung der drei  
Ökobilanzmethoden

Ökologische Knappheit UBP 1997	Eco-indicator 99	CML-Methode
<b>Bezug</b> Stoffströme Politische Qualitätsziele	Schaden an menschlicher Gesundheit, Ökosystem- qualität, Ressourcen	Abbau Ressourcen, Umwelt- belastung, Leben
<b>Erscheinungsjahr</b> 1998	2000	1992
<b>Geltungsbereich</b> Schweiz (auch in NL,B,S,A,Dk,u.a.)	Europa	Global
<b>Vollständigkeit</b> ca. 100 Indikatoren	ca. 200 Indikatoren	Ca. 560 Indikatoren
<b>Aggregierbarkeit</b> Ja: Umweltbelastungspunkte UBP	Ja: Eco-indicator points Pt, häufig milli-points mPt	Nein: Wirkungsklassen (Ozonabbau, Treibhaus, usw.)
<b>Legitimation</b> Sozialpolitische und wissen- schaftliche Stofffluss- Abschätzungen	Naturwissenschaftliche Schadenmodellierung von Emissionen	Naturwissenschaftliche Wirkungsanalyse

Ökobilanz-Software

Alle drei Methoden können mit der verwendeten Ökobilanz-Software gleichzeitig berechnet werden. Die Software berücksichtigt das aktuelle Ökoinventar für Transportsysteme gemäss BUWAL [8],[9] und das Ökoinventar für Energiesysteme [10]. Entsprechende Umweltdaten über neue Antriebssysteme werden ebenfalls berücksichtigt [11]-[25].

## 2.2.2 Wirtschaftlichkeit

Wirtschaftlichkeitsrechnung

Bei der Wirtschaftlichkeitsrechnung wird der Vollkostenansatz gewählt. Es werden die Gesamtkosten, ausgenommen Management-Aufwand berücksichtigt (Siehe Kapitel 3.3). Es werden die Hauptkostenarten fixe und variable Betriebskosten, Personalkosten für Busfahrer sowie Kapitalkosten unterschieden. Die Kosten werden pro Jahr ermittelt und auf die gefahrenen Kilometer umgerechnet. Die Einnahmenseite wird von der Antriebsvariante nicht tangiert und deshalb in dieser Studie nicht berücksichtigt.

## 2.2.3 Zusammenführen von Wirtschafts- und Umweltbetrachtung

Darstellung der Öko-Effizienz

Die Resultate der Ökobilanz und der Kostenrechnung werden mit Balkendiagrammen graphisch dargestellt. Die Öko-Effizienz wird in einem durch die Achsen Relative Umweltbelastung und Relative Kosten aufgespannten Diagramm dargestellt.

1) REGIS 2.2 [3]



## 3 Systemgrenzen

### 3.1 Beschrieb der Linie 4 und der Antriebsvarianten

Die Linie 4 ist mit 4.7 km ein relativ kurzer Rundkurs, der im Gegenuhrzeigersinn den Hauptbahnhof mit dem Quartier „Breite“ verbindet (vgl. Abbildung 4). Der Kurs führt durch das Zentrum von Winterthur mit stark befahrenen Strassen und dicht besiedeltem Gebiet. Die Strassenverhältnisse sind mit Ausnahme von Technikum- und Zürcherstrasse relativ eng und auf einem Teilstück von knapp 1 km sind Steigungen von durchschnittlich 6% zu überwinden.

Charakterisierung der Buslinie 4

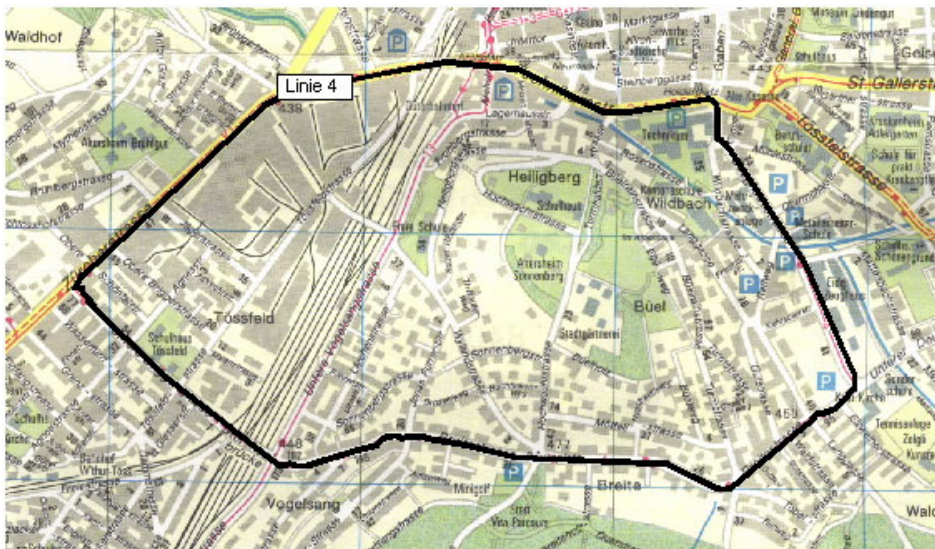


Abbildung 4:  
Streckenplan der Linie 4 „Breite“

Der Kurs wird derzeit von zwei 2-achsigen Solobussen befahren, die mit Diesel betrieben werden und zusammen eine jährliche Fahrleistung von 165'000 km erbringen. Bis 1996 wurde die Linie 4 mit Trolleybussen befahren. Im Zusammenhang mit dem Neubau der Storchenbrücke wurde auf Dieselfbusse umgestellt. Seither sind nach 36 Jahren elektrifiziertem Betrieb Trolleybusse wie auch die Fahrleitung aus Altersgründen nicht erneuert worden, respektive über der Storchenbrücke nicht vorhanden.

Die Verkehrsbetriebe Winterthur stehen vor dem Entscheid, was für Busse in Zukunft auf der Linie 4 verkehren werden. Sollen weiterhin Dieselfbusse zum Einsatz kommen, sollen wieder- wie noch vor fünf Jahren - Trolleybusse verkehren oder soll konsequent auf erneuerbare Energien gesetzt werden, indem CO<sub>2</sub>-neutrales Biogas als Treibstoff gewählt wird? Die wichtigsten Merkmale der drei Varianten sind folgende:

Die Antriebsvarianten „Diesel“, „Gas“ und „Trolley“

- **Variante „Trolley“:** Trolleybusse fahren mit Strom (2kWh pro km) und verursachen dadurch keine direkten Schadstoffemissionen. Sie sind auf das Fahrleitungsnetz angewiesen und können deshalb nicht beliebig flexibel eingesetzt werden.

- **Variante „Diesel“:** Die Dieselbusse fahren mit nahezu schwefelfreiem „Greendiesel“ (0.4 Liter pro km) und können auf dem gesamten Strassennetz eingesetzt werden.
- **Variante „Biogas“:** Die Gasbusse fahren mit CO<sub>2</sub>-neutralem Biogas (0.375 kg pro km) und können ebenfalls auf dem gesamten Strassennetz eingesetzt werden. Eine Betankung reicht für die Bewältigung der Tagesfahrleistung der Busse der Linie 4.

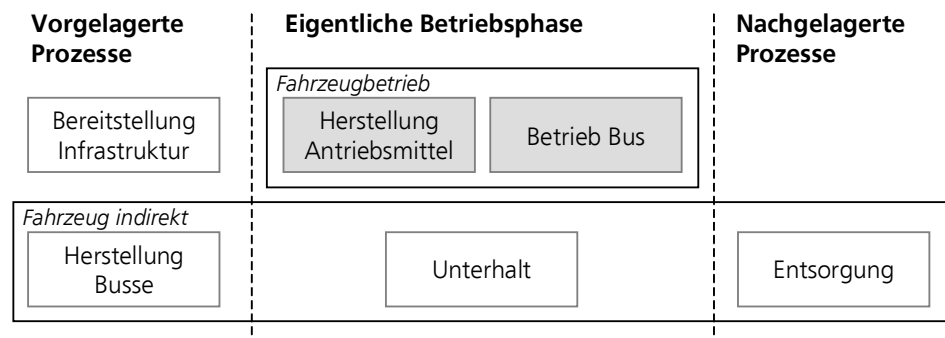
Diese drei Antriebssysteme bilden die Vergleichsobjekte der vorliegenden Studie.

### 3.2 Prozesse Umwelt

Lebenszyklus-Analyse mit vor- und nachgelagerten Prozessen

In einer Ökobilanz wird von einer Lebenszyklus-Analyse ausgegangen, welche neben der eigentlichen Betriebsphase auch die vor- und nachgelagerten Prozesse betrachtet. In Abbildung 5 ist der Lebenszyklus für die Transportsysteme Trolley-, Diesel- und Gasbus schematisch dargestellt. Ein solches System beinhaltet die Herstellung der Fahrzeuge und die Bereitstellung der Infrastruktur als vorgelagerte Prozesse sowie die Entsorgung der Fahrzeuge als nachgelagerten Prozess. In der Betriebsphase werden die Prozesse Herstellung Antriebsmittel, Betrieb Fahrzeug und Unterhalt unterschieden.

Abbildung 5:  
Lebenszyklus von Transportsystemen (grau hinterlegt die für die Ökobilanz relevanten Prozesse)



Ökobilanz für Prozesse  
„Herstellung Antriebsmittel“ und  
„Betrieb Bus“

Die Ökobilanzierung soll Unterschiede der drei Antriebssysteme bezüglich Umweltauswirkungen aufzeigen. Es werden deshalb nur Prozesse betrachtet, in welchen sich Trolley-, Diesel- und Gasbusse wesentlich unterscheiden. Dies sind die in Abbildung 5 grau hinterlegten Prozesse „Herstellung Antriebsmittel“ und „Betrieb Bus“, welche zusammen den eigentlichen *Fahrzeugbetrieb* beschreiben. Weitere Annahmen für die Bilanzierung der Variante Biogas sind im Anhang A2 zusammengestellt.

Die als *Fahrzeug indirekt* zusammengefassten Prozesse sind für die drei Antriebssysteme im wesentlichen gleich. Der Prozess Infrastruktur weist bezüglich Fahrleitungen und Tankstellen Unterschiede auf, welche aber nicht ins Gewicht fallen und sich schlecht gegenüber anderen Buslinien abgrenzen lassen. Diese Prozesse werden deshalb nicht berücksichtigt.

Für die oben beschriebenen Prozesse werden die weltweit entstehenden Emissionen betrachtet. Die direkten Emissionen, welche in der Stadt Winterthur anfallen, werden in Kapitel 5.1 und 8 separat betrachtet und fließen auch in die Schlussfolgerungen ein.

Räumliche Systemgrenzen

### 3.3 Prozesse Kosten

Die Systemgrenzen, die für die ökologische Betrachtung gelten, sind auch für die ökonomische Sicht relevant. Einige Grenzbereiche des Prozesses werden im Folgenden näher erklärt.

Für den Vergleich werden alle Investitionen und operativen Kosten berücksichtigt, die mit den Fahrten der Busse in direktem Zusammenhang stehen, auch wenn sie bei beiden Varianten gleich sind. Nicht berücksichtigt wird der Management-Aufwand, der mit dem operativen Betrieb der Busse nicht in direktem Zusammenhang steht. Dieser umfasst Verwaltungskosten, Marketing, Linienmanagement sowie Kosten für Billetautomaten und Haltestellen.

Management-Aufwand

Die heute bestehende Trolleybus-Fahrleitung ist sanierungsbedürftig und muss im Falle einer weitergehenden Nutzung durch Trolleybusse bis auf die Pylone komplett ausgewechselt werden. Dies gilt auch für die Steuerungsanlage. Durch die Tatsache, dass ein Teil der Strecke schon durch andere Trolleybuslinien elektrifiziert ist, reduziert sich der Investitionsbedarf für die Fahrleitung um ca. 1/10. Der jährliche Unterhaltsaufwand auf diesem Streckenteil wird ebenfalls aufgeteilt, da dieser mit der Beanspruchung der Fahrleitung durch fahrende Busse korreliert.

Investitionen in die Fahrleitung

Die notwendigen Investitionen in eine Gastankstelle werden in die Kostenbetrachtung der Gasvariante einbezogen, da diese einen beachtlichen Aufwand darstellen.

Investitionen in die Gastankstelle

Die Personalkosten für den Betankungsprozess werden bei der Diesel- und der Gasvariante berücksichtigt, da diese im Vergleich zum Trolleybus ein zusätzlicher Aufwand darstellen.

Betankungsprozess

Der betrachtete Zeitraum beträgt 12 Jahre. Anlagewerte am Ende des Betrachtungshorizontes werden der jeweiligen Variante als Restwerte zugeordnet.

Betrachtungshorizont

### 3.4 Weitere wichtige Annahmen

Es wird davon ausgegangen, dass während des Betrachtungszeitraumes von 12 Jahren die wichtigsten Parameter für die drei Antriebsvarianten Trolley, Diesel und Biogas konstant bleiben. Alle drei werden als reine Varianten

Konstanz des Szenarios bei den Grundvarianten

gerechnet, d.h. es wird keine Vermischung der Antriebsarten oder eine Umstellungen während des Zeitraumes vorgenommen.

Qualitative Kriterien Es wird keine Quantifizierung der Kosten und Wirkungen für qualitative Effekte vorgenommen. Qualitative Kriterien fliessen in Textform in die Beurteilung ein. Betrachtet werden die Faktoren Lärm, Elektromog, Flexibilität, Betrieb und Akzeptanz der Bevölkerung.

## 4 Beschreibung der Varianten

Die Varianten Die Winterthurer Verkehrsbetriebe planen für die Linie 4 unabhängig von der Antriebsart zwei 2-achsige Busse mit ca. 30 Sitz- und 50 Stehplätzen einzusetzen. Die Busse sollen ab 2005 betrieben werden und entsprechend mit modernster Technologie ausgestattet sein. Im Mittelpunkt dieses Systemvergleichs stehen die drei Grundvarianten „Trolley“, „Diesel“ und „Biogas“. Sie werden durch drei Alternativ-Varianten ergänzt, die aus Sicht Umwelt interessant sind.

Tabelle 2:  
Die drei Grund- und Alternativ-  
Varianten

Grundvariante	Alternativ-Varianten
<b>Trolley</b> (mit europäischem Strommix)	<b>Trolley – Wasserkraft</b> (mit Wasserkraftstrom als alternatives Antriebsmittel)
<b>Diesel</b> (mit schwefelarmem Diesel)	-
<b>Biogas</b> (gemäss langfristiger Situation des Biogasmarktes)	<b>Gasbus – Erdgas</b> (mit Erdgas als alternatives Antriebsmittel)
	<b>Biogas 2002</b> (gemäss heutiger Situation des Biogasmarktes)

Sensitivitäten Es werden Sensitivitäten bezüglich der grössten Kostenfaktoren gerechnet, in denen sich die drei Hauptvarianten unterscheiden und die mit Unsicherheit behaftet sind. Es sind dies der Abschreibungshorizont, die Kapitalkosten, Energiepreise, Steuer- und Emissionsgesetze.

### 4.1 Umwelt

Umweltauswirkungen pro  
Fahrzeugkilometer

Für den Vergleich der drei Antriebssysteme werden die Umweltauswirkungen für das Fahren von einem Fahrzeugkilometer (1 Fzkm) bilanziert.

Europa-Mix bei der  
Stromproduktion für den Trolley

Für die **Variante Trolley** entstehen keine direkten Schadstoffemissionen beim Betrieb der Busse. Da die Schweiz Teil des gesamteuropäischen Stromverbundes ist und die Marköffnung weitergeht, wird den Berechnungen der Grundvariante der europäische Mix für die Stromproduktion

(UCPTE-Mix<sup>2)</sup>) zugrunde gelegt. Die Energie wird in Europa im Durchschnitt zu fast 50% aus fossilen Energieträgern (Kohle, Erdöl und Erdgas) produziert und verursacht deshalb hohe Emissionen. Die Verwendung des UCPTE-Mixes ist eine konservative Annahme, da der aktuelle Schweizer Strommix aufgrund des hohen Wasserkraftanteils ökologischer ist als der europäische (vgl. Zusammensetzung verschiedener Strom-Mixe in Anhang A4). Als Alternativ-Variante wird die Umweltbelastung mit Schweizer Wasserkraftstrom als Antriebsmittel bilanziert.

Für die **Variante Diesel** steht fest, dass die neuen Busse bezüglich Abgase die EURO3-Norm einhalten müssen, welche seit dem Jahr 2000 gilt. Die neuen Busse werden mit einem CRT-Filter ausgerüstet sein, welcher die Partikel-Emissionen auf das Niveau von EURO4 reduziert [23], und sie werden mit nahezu schwefelfreiem „Greendiesel“ fahren. Die reduzierten Schwefelemissionen des Diesels werden gemäss [8] berücksichtigt. Es kann davon ausgegangen werden, dass Verschärfungen der Abgasvorschriften für Dieselfahrzeuge nach Gesetz keine technischen Aufrüstungen der Fahrzeuge notwendig machen, da die Bestimmungen zum Zeitpunkt seiner Inverkehrsetzung gelten.

EURO3-Norm und CRT-Filter für den Dieselbus

Die **Variante Biogas** beschreibt einen mit Biogas betriebenen Gasbus. Die in dieser Studie verwendeten Zahlen für den Prozess „Betrieb Bus“ orientieren sich an einem Gasbus mit Magermotor, welcher etwas höhere NO<sub>x</sub>-Emissionen aufweist als ein herkömmlicher Motor ( $\lambda=1$ ), jedoch einen kleineren Treibstoffverbrauch hat. Die Busse sind mit geregelten Dreiweg-Katalysatoren ausgestattet. Die CO<sub>2</sub>-Neutralität des Biogases wird berücksichtigt.

Biogas mit Erdgas-Qualität als Antriebsmittel

In der Grundvariante wird für die Herstellung des Biogases ein Szenario für das Jahr 2025 zugrunde gelegt, welches davon ausgeht, dass mittelfristig das Potenzial der Vergärung biogener Abfälle ausgeschöpft wird. Durch die Vergärung wird rohes Biogas (Rohgas) gewonnen, welches als Rohstoff zur Verfügung steht. Dieses Rohgas muss für den Einsatz als Antriebsmittel zu Biogas mit Erdgas-Qualität (Reingas) aufbereitet werden.

Die erste Alternativ-Variante zeigt die Situation 2002 und berücksichtigt Gutschriften für die Entlastung alternativer Entsorgungswege biogener Abfälle, weil in der heutigen Situation bei grösserer Nachfrage nach Produkten der Vergärung mehr biogenes Material vergärt wird und somit andere Verwertungsarten entlastet werden. Eine zweite Alternativ-Variante bilanziert herkömmliches Erdgas als Antriebsmittel (siehe dazu Anhang A2).

2) Union pour la coordination de la production et du transport de l'électricité

## 4.2 Kosten

Für alle drei Varianten gelten die selben Grundlagen bezüglich der Berücksichtigung von Kosten. Die Kostenkonzepte, welche der Wirtschaftlichkeitsrechnung zu Grunde liegen, sind im Folgenden dargestellt.

Datenquellen	Die Kostenangaben für Diesel und Trolleybusse stammen von den Winterthurer Verkehrsbetrieben und wurden verifiziert mit Erfahrungswerten diverser Betriebe des öffentlichen Verkehrs, Busherstellern und Experten für den Einsatz von Diesel- und Trolleybussen im öffentlichen Verkehr. Die Angaben über die Gasvariante stammen von Betreibern, Herstellern, Experten und Zulassungsbehörden von Gasbussen und Gastankstellen. Es wurden auch externe Studien berücksichtigt ([26]-[27]).
Fixe Betriebskosten	Fixe Betriebskosten bestehen aus den Kostenkomponenten Gebäudeunterhalt/ Infrastruktur (inklusive Tankstelle)/ Werkstatt/ Depot, den Kapitalkosten Werkstatt/ Garage sowie den Personalkosten Technik (inklusive Leitung und Projekte). Bei der Trolley-Variante kommen die Unterhaltskosten für die Fahrleitung hinzu, bei der Gas-Variante die obligatorische Sicherheitsüberprüfung der Gasflaschen.
Variable Betriebskosten	Variable Betriebskosten beinhalten Treibstoff- respektive Stromkosten, Versicherungen und Gebühren (variabel), Bereifungskosten, Reinigungs- und Verbrauchsmaterial, Ersatzteile/ Fremdleistungen, variable Personalkosten Technik. Bei der Gas- und der Diesel-Variante sind zusätzlich Personalkosten des Betankungsprozesses sowie Schmierstoffe zu berücksichtigen.
Variable Betriebskosten: Technischer Stand/ Technologische Reife	Da für alle drei Antriebsvarianten neue Busse beschafft werden, resultieren bei allen Varianten dem heutigen Stand der Technik entsprechende betriebliche Zuverlässigkeit, Kosten- und entsprechende Verschleisswerte. Das Ersetzen der derzeit eingesetzten Trolley- und Dieselbusse entspricht einem technologischen Generationenwechsel. Der Kostenvorteil durch neues Material wird somit gemindert durch den erhöhten Schulungs- und Optimierungsaufwand, der anfällt, bis man mit den neuen technischen Gegebenheiten vertraut ist und möglicherweise vorhandene Kinderkrankheiten beseitigt sind. Zu erwarten sind solche in erster Linie beim Dieselbus und dessen Abgasreinigungstechnologie (CRT-Filter) sowie dem Gasbus dessen Magermotortechnologie. Entsprechender Mehraufwand ist in der Studie berücksichtigt. Darüber hinaus binden die Verträge mit den Herstellern diese teilweise in die Verantwortung für die Funktionstüchtigkeit der Fahrzeuge ein.
Personalkosten Fahrer	Personalkosten Fahrer werden bei allen Varianten mit in die Betrachtung einbezogen und beinhalten die gesamten Personalkosten. In der Gas-Variante wird die Zeit für die Fahrt zur Tankstelle in die variablen Betriebskosten (Treibstoff) eingerechnet.

Die Investitionskosten berücksichtigen Investitionskosten der Busbeschaffung abzüglich des Restwerts der Busse nach dem Betrachtungszeitraum, die Desinvestitionskosten für den Abbruch der Fahrleitung bei den Varianten Diesel und Gas sowie die Investitionskosten zur Erneuerung der Fahrleitung bei der Variante Trolley abzüglich des Restwerts der Fahrleitung nach dem Betrachtungszeitraum. Nicht berücksichtigt sind die Kosten der Gastankstelle. Diese sind in Anhang A5 bei der Darstellung der Betankungsalternativen berücksichtigt und fliessen direkt in die Treibstoffkosten ein. Zur Berechnung der Investitionskosten ist die Annuitätenmethode benutzt worden. Für die Amortisation der Investitionen werden die üblichen Abschreibungshorizonte angewendet. Für die Kapitalkosten wird der in den Winterthurer Verkehrsbetrieben übliche Planungszinssatz eingesetzt.

Investitionskosten

Es sind für keine der drei Antriebsvarianten spezifische Zuschüsse/Subventionen zu erwarten.

Zuschüsse

Investitionskosten, welche durch eine Antriebsvariante entstehen, werden der Variante komplett angerechnet. Wenn dadurch im Betrieb woanders konkret Kosten gespart werden (z.B. notwendige Erneuerungsarbeiten) oder Einnahmen generiert werden (z.B. Vermietung der Garage nach Ablauf des Betrachtungshorizontes), werden diese Synergieeffekte der Variante kostenreduzierend angerechnet.

Synergieeffekte

Ein möglichst einheitlicher Fahrzeugpark senkt die Kosten, da durch Zusammenlegung von Prozessen Skaleneffekte entstehen. Das Erweitern der Antriebstechnologien um eine Gasvariante ohne Reduktion um eine andere Antriebsart hat den gegenteiligen Effekt. So führt die Haltung von nur zwei Gasbussen neben der Trolley- und der Dieselflotte zu zusätzlichen Kosten. Am Kostengünstigsten ist die Einführung von mindestens 8 Gasbussen, wenn eine alte, wartungsaufwändige Technologie abgelöst werden kann. Dies senkt dann insbesondere die Kostenblöcke Wartung, Werkzeug, Tankstelle und Schulung.

Vielfalt der Fahrzeuge und Technologien als Kostenfaktor

### Spezielles für den Gasbus

Die beiden Antriebssysteme Trolley und Diesel werden von den Winterthurer Verkehrsbetrieben schon heute benutzt und die Technologien (Betrieb, Wartung, Ersatzteile, Lagerung etc.) beherrscht. Kontakte zu Herstellern sowie anderen Benutzern bestehen ebenfalls. Beim Gasantrieb jedoch ist mit Aufwand zur Einführung einer vollständig neuen Technologie bezüglich Ausbildung, Vergrösserung des Werkzeugparks und des Ersatzteillagers, Betankungsanlage, Sicherheitsvorkehrungen etc. zu rechnen.

Einführung einer zusätzlichen Antriebstechnologie

Die Sicherheit von Gasbussen ist gewährleistet und ausser dem obligatorischen Test der Gasflaschen alle 5 Jahre ist mit keinem zusätzlichen Mehraufwand zu rechnen. In der Schweiz sind bereits mehrere Erdgastankstellen in Betrieb und es sind keine sicherheitsrelevanten Probleme bekannt.

Sicherheit

Bauliche Massnahmen in Busdepots	Mit baulichen Massnahmen an den Depots ist nur beim Bau einer Gastankstelle zu rechnen. Diese Kosten fliessen in die Darstellung der Betankungsalternativen ein (Anhang A5) und sind in den Treibstoffkosten enthalten.
Betankungsanlage	Es existiert derzeit keine Gastankstelle in Winterthur, die zwei Busse pro Tag betanken kann. Es gibt jedoch drei realisierbare Betankungsmöglichkeiten: Der Winterthurer Gasversorger hat zugesagt, im Falle einer Busbestellung durch die Winterthur Verkehrsbetriebe eine bestehende, jedoch derzeit nicht benutzte Schnellbetankungsanlage in Oberwinterthur zu renovieren. Alternativ wäre der Bau einer eigenen Langsambetankungsanlage oder einer Schnellbetankungsanlage im eigenen Depot möglich. Die drei Alternativen sind im Anhang A5 dargestellt und die Auswirkungen auf die Kosten pro kg Gas berechnet.
Steuervorteil für den Treibstoff Biogas	Für Biogas hat der Bund eine mengenbefristete Steuerbefreiung festgelegt. Diese wird derzeit nicht ausgeschöpft, so dass der Verbrauch der beiden Busse damit gedeckt werden kann. Ein Wegfall der Steuererleichterung für Biogas ist nicht geplant. Der Steuervorteil des Biogases wird langfristig anhalten, falls die Treibstoffbesteuerung gemäss CO <sub>2</sub> -Gesetz umgesetzt wird. Im Übrigen sind Betriebe des öffentlichen Verkehrs in der Schweiz zu 75% von Treibstoffsteuern befreit.
Betankungsprozess	Die heutigen Gasbetankungsanlagen zeigen einen hohen Grad an Zuverlässigkeit und der Tankprozess verursacht gegenüber einer Dieseltankstelle keinen wesentlich höheren Zeitaufwand.
<b>Spezielles für den Dieselbus</b>	
Abgasnachbehandlung	Zur Reduktion der krebserregenden Partikel werden bei Dieselnissen Partikelfilter (CRT- Filter) eingesetzt, die jedoch zur Zeit noch einige Unzulänglichkeiten aufweisen und so einen gewissen Zusatzaufwand (Ausfall, Reparatur) verursachen. Die Verkehrsbetriebe gehen davon aus, dass dank der grossen Anstrengung der Hersteller diese Probleme in den nächsten Jahren gelöst werden. In den hier verwendeten Kaufpreisen für die Dieselnisse sind die Filter eingerechnet. Ein moderater Mehraufwand für die Wartung der Dieselfahrzeuge ist in die Kostenbetrachtung einbezogen worden. Der leicht erhöhte Kraftstoffverbrauch durch die Filter wird ebenfalls berücksichtigt.



## 5 Umweltauswirkungen

In der Sach- und Wirkungsbilanz werden die Material- und Energieflüsse mit Hilfe einer Ökobilanz-Software erfasst und ausgewertet. Die Eingabedaten sind in Anhang A2 zusammengestellt.

Eingabedaten

### 5.1 Sachbilanz

In der Sachbilanz werden die Material- und Energieflüsse der drei Varianten berechnet. Im Folgenden werden für die Umweltbereiche Luft und Ressourcenverbrauch Sachbilanzen anhand ausgewählter Stoffe dargestellt. Die Resultate sind in Prozenten ausgedrückt. Die entsprechenden absoluten Werte sind im Anhang A2 aufgeführt.

Material- und Energieflüsse

Im Bereich der Auswirkungen auf den Umweltbereich Luft werden die vier wichtigsten Stoffe CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> und Partikel dargestellt. Die Bilanzen werden jeweils auf den höchsten Emittenten (100%) normiert.

Emissionen Luft

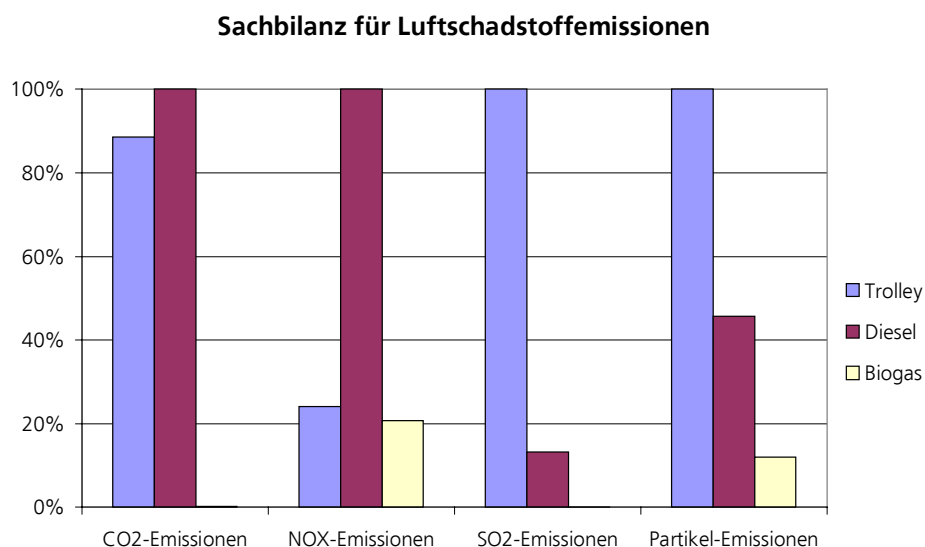


Abbildung 6:  
Sachbilanz für wichtige  
Luftschadstoffe

Aus der Abbildung 6 geht hervor, dass die Variante Biogas bei allen Luftschadstoffemissionen überlegen abschneidet. Biogasbusse fahren CO<sub>2</sub>-neutral, während die beiden anderen Varianten etwa gleich viel CO<sub>2</sub> emittieren. Die Variante Diesel verursacht bedeutend grössere NO<sub>x</sub>-Emissionen als die anderen Varianten, während bei den SO<sub>2</sub>-Emissionen die Variante Trolley einen deutlich höheren Betrag aufweist. Bezüglich Partikel weist die Variante Trolley gegenüber Diesel rund doppelt so grosse Emissionen auf.

Emissionen der  
Verbrennungsprozesse zur  
Stromherstellung

Die tiefen Emissionen des Gasbusses basieren auf der angenommenen CO<sub>2</sub>-Neutralität und der Tatsache, dass das Biogas praktisch kein Schwefel enthält und Stickstoff lediglich als stabiles Molekül führt, welches an der Verbrennung nicht teilnimmt. Das teilweise schlechte Abschneiden der Variante Trolley wird durch die Wahl des Antriebsmittels beeinflusst. Die europäische Stromproduktion basiert zu fast 50% auf fossilen Energieträgern und verursacht in der Herstellung durch die Verbrennungsprozesse grosse SO<sub>2</sub>-, CO<sub>2</sub>- und Partikel-Emissionen. Im Gegensatz dazu konnten die Betriebsemissionen von Dieseln (SO<sub>2</sub>, Partikel) in den letzten Jahren stark reduziert werden.

Ökostrom als Alternative?

Wegen dem grossen Einfluss der Stromherstellung auf die Sachbilanz drängt sich die Frage nach ökologischer Stromproduktion auf. In der Sensitivitätsanalyse in Kapitel 5.3 wird deshalb diskutiert, wie sich die Verwendung von Schweizer Wasserkraft-Strom gegenüber konventionellem Strom auswirken würde.

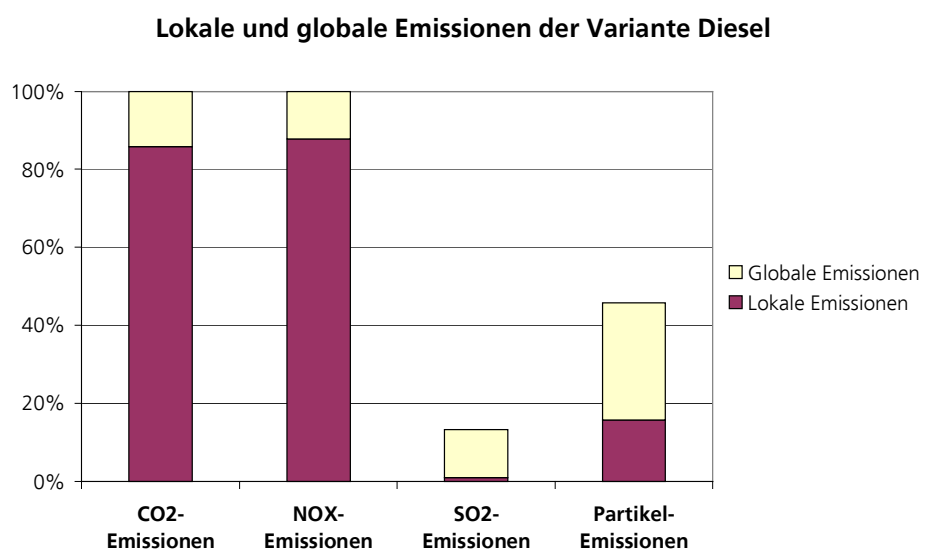
Lokale versus globale Emissionen

Die hier durchgeführte Betrachtung der Umweltbelastung bezieht sich auf die globalen, weltweiten Auswirkungen. Wird der Blickwinkel auf die Lebensqualität in Winterthur gerichtet, dann interessieren die *in* Winterthur anfallenden direkten Emissionen, welche die Gesundheit der Bevölkerung und die lokalen Ökosysteme gefährden.

Gesundheitsgefährdung durch  
lokale Emissionen

In der Betrachtung der lokalen Emissionen interessieren insbesondere die Partikel und NO<sub>x</sub> als Vorläufersubstanz von Ozon. Neben der kanzerogenen Wirkung der Partikel verursachen diese Stoffe Atemwegserkrankungen und Allergien [28].

Abbildung 7:  
Lokale und globale Emissionen  
der Variante Diesel



Lokale Emissionen des  
Dieselbusses

Die Aufteilung auf lokale und globale Emissionen wird nur für den Dieselbus dargestellt, weil der Trolley lokal *keine* und der mit Biogas aus der Region Winterthur betriebene Gasbus *fast nur* lokale Schadstoffemissionen

verursacht, welche aber gemäss oben stehender Auswertung (Abbildung 6) klein sind. Die Abbildung 7 zeigt, dass ein Grossteil der Emissionen des Dieselmotors als lokale Emissionen in Winterthur anfallen.

Die Varianten Trolley und Diesel brauchen etwa gleichviel nicht erneuerbare Primärenergie (Zahlen im Anhang A2), während die Variante Biogas fast ausschliesslich erneuerbare Energie verwendet. Im Ressourcenverbrauch schneidet die Variante Biogas deshalb besser ab als die anderen zwei.

Ressourcenverbrauch

### Beurteilung Sachbilanz

Die Sachbilanz der ausgewählten Emissionen zeigt, dass die Variante Gasbus mit Abstand die kleinsten Emissionen aufweist. Die beiden anderen Varianten schneiden in verschiedenen Aspekten unterschiedlich ab. Auf dieser Stufe kann deshalb keine generelle Aussage über die globale Umweltbelastung durch Trolley- und Dieselmotors gemacht werden. Interessant ist deshalb die Gewichtung der verschiedenen Aspekte untereinander, was in der Wirkungsbilanz erfolgt.

Globale Betrachtung

Bei Fokussierung auf die lokalen Emissionen in Winterthur schneidet die Variante Trolley am besten ab, weil sie keine lokalen Emissionen verursacht. Die grossen CO<sub>2</sub>- und NO<sub>x</sub>-Emissionen der Variante Diesel fallen hauptsächlich lokal an.

Lokale Betrachtung

## 5.2 Wirkungsbilanz

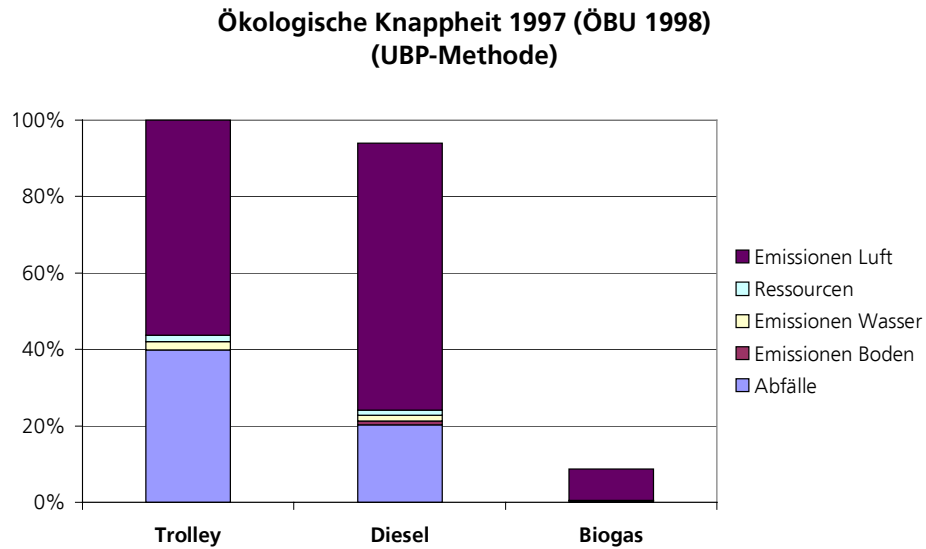
Die in der Sachbilanz berechneten Emissionen werden mit drei verschiedenen Methoden auf ihre Wirkung in der Umwelt analysiert. Es sind dies die Methode der Ökologischen Knappheit 1997, die Methode Eco-Indicator 99 und die CML-Methode (Beschreibung im Anhang).

Drei Ökobilanz-Methoden

### Methode der Ökologischen Knappheit 1997

Die mit der Methode der Ökologischen Knappheit 1997 berechnete Wirkungsbilanz ist in Abbildung 8 dargestellt. Die Umweltbelastungspunkte der drei Varianten sind am Trolley (100%) normiert.

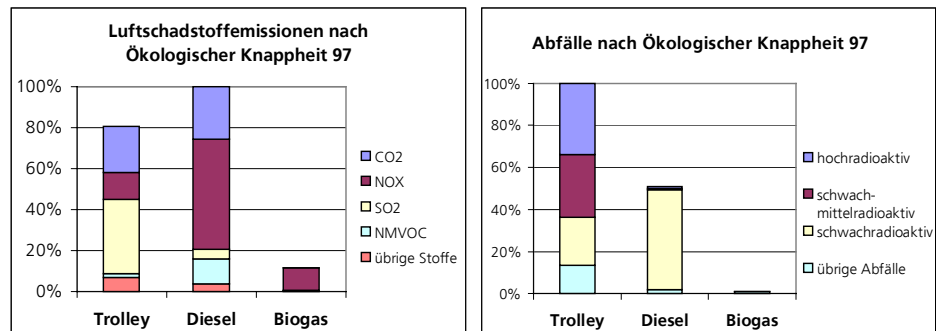
Abbildung 8:  
Beurteilung der  
Umweltbelastung nach der  
Methode der Ökologischen  
Knappheit



Biogas schneidet deutlich besser  
ab als Diesel und Trolley

Die Wirkungsbilanz der drei Transportsysteme zeigt sehr ähnliche Resultate für die Varianten Trolley und Diesel, während die Variante Biogas mit nur etwa 10% Umweltbelastung deutlich besser abschneidet. Bei den beiden ersten Varianten wird die Umweltbelastung fast ausschliesslich durch die Auswirkungen auf den Umweltbereich Luft und durch Abfälle verursacht. Diese beiden Bereiche werden in Abbildung 9 nach den Hauptursachen aufgeschlüsselt:

Abbildung 9:  
Hauptursachen der  
Umweltbelastung nach  
Ökologischer Knappheit 97



Luftbelastung

Die Variante Diesel verursacht grössere Luftbelastungen als die Variante Trolley. Ausschlaggebend ist der Parameter  $\text{NO}_x$ , doch auch beim  $\text{CO}_2$  und  $\text{NMVOC}^{3)}$  weist die Variante Diesel grössere Belastungen auf. Die Variante Trolley schneidet bezüglich  $\text{SO}_2$  schlechter ab. Die Variante Biogas weist einzig bei  $\text{NO}_x$  eine gewisse Luftbelastung auf, welche aber insgesamt klein ist. Ein ähnliches Bild ergab bereits die Sachbilanz im vorhergehenden Kapitel.

3) NMVOC: Nicht Methan VOC

Wie in Abbildung 9 auf der rechten Seite gezeigt wird, variiert die Umweltbelastung bei den Abfällen wegen den Unterschieden bezüglich radioaktiver Abfälle stark. Nur bei der Stromerzeugung fallen hochradioaktive Stoffe an. Um den Einfluss der Stromproduktion hervorzuheben, wird im Kapitel 5.3 die Sensitivität bezüglich der Art der Stromherstellung untersucht.

Radioaktive Abfälle sind eine grosse Umweltbelastung

### Methode Eco-Indicator 99

Im Gegensatz zur obigen Bilanz zeigt die Auswertung nach der Methode Eco-Indicator 99 einen deutlichen Unterschied zwischen den beiden Varianten. Dies lässt sich damit begründen, dass die Ansätze der beiden Methoden verschieden sind (vgl. Anhang A1). Der Eco-Indicator ist eine schadenorientierte Methode und beurteilt die drei Schadenskategorien „Menschliche Gesundheit“, „Qualität der Ökosysteme“ und „Ressourcenvorrat“ indem verschiedene Wirkungen untersucht werden.

Deutlicher Unterschied zwischen den beiden Varianten

Abbildung 10 zeigt die an der Variante Diesel (100%) normierte Umweltbelastung nach Eco-Indicator 99, aufgeschlüsselt nach verschiedenen Wirkungskategorien.

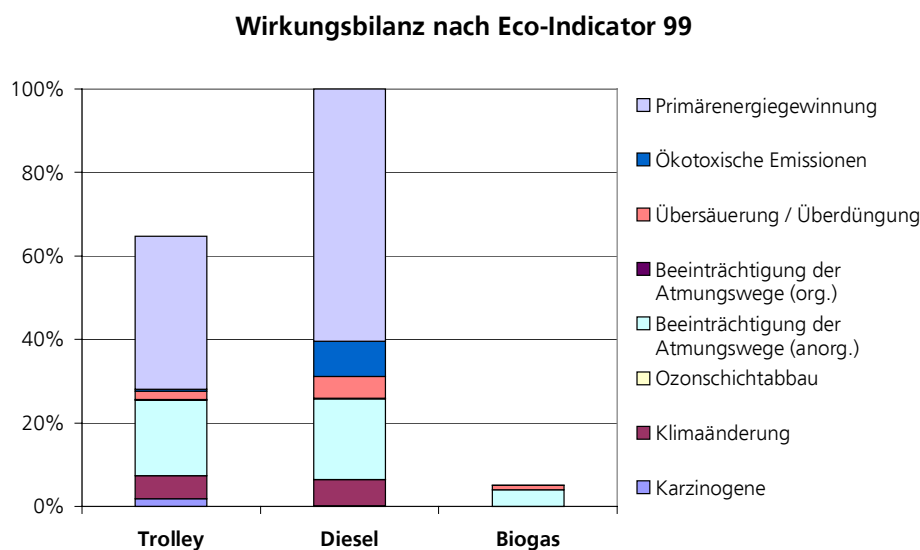


Abbildung 10:  
Wirkungsbilanz nach Eco-Indicator 95

In Abbildung 10 schneidet der Biogasbus wiederum deutlich besser ab als Diesel- und Trolleybus. Bei beiden Varianten macht die Primärenergiegewinnung (Schadenskategorie Ressourcen) mehr als die Hälfte der Umweltbelastung aus. Obwohl laut Sachbilanz der Trolley mehr Primärenergie verbraucht, zeigt in dieser Bilanz der Dieselbus mehr negative Wirkung. Die Begründung liegt in den unterschiedlichen Energiequellen, nämlich Kohle für die Stromherstellung und Erdöl für die Dieselherstellung, welche als verschieden stark umweltbelastend beurteilt werden. Im Gegensatz zur ersten Methode werden hier die radioaktiven Abfälle nicht beurteilt.

Primärenergiegewinnung hat grosse Umweltwirkung

Alle drei Varianten beeinträchtigen die Atemwege des Menschen.

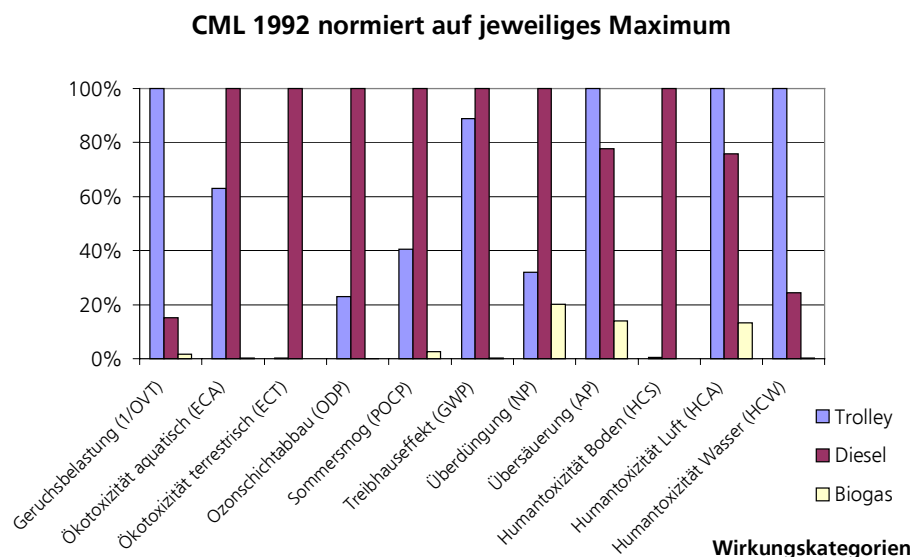
## CML-Methode

Bestätigung der anderen  
Auswertungen

Obwohl die CML-Methode nicht vom Ansatz einer Aggregation der Umweltbelastungszahl ausgeht, lassen sich doch einige Parallelen im Ergebnis zu den übrigen Bewertungsmodellen aufzeigen. Die guten Resultate der Variante Biogas werden auch durch diese Auswertung bestätigt. Einzig in den Wirkungsklassen Überdüngung, Übersäuerung und Humantoxizität Luft zeigt auch Variante Biogas eine gewisse Belastung.

Bei der Betrachtung der beiden anderen Varianten zeigt sich, dass der Dieselbus bei den meisten Bereichen weniger gut abschneidet als der Trolleybus. Besonders ausgeprägt ist dies bei den Wirkungsklassen Ökotoxizität terrestrisch (ECT), Ozonschichtabbau (ODP), Überdüngung (NP) und Humantoxizität Boden (HCS). Andererseits schneidet der Trolley bei der Geruchsbelastung (1/OVT) und der Humantoxizität Wasser (HCW) deutlich schlechter ab.

Abbildung 11:  
Wirkungsbilanz nach CML-Methode normiert auf das jeweilige Maximum pro Wirkungsklasse



## Beurteilung Wirkungsbilanz

Gesamtbeurteilung  
Wirkungsbilanzen

Die Auswertungen nach den drei Ökobilanz-Methoden deuten übereinstimmend auf eine deutlich kleinere Umweltbelastung für die Variante Gasbus. Welche der anderen zwei Varianten besser ist, lässt sich nicht eindeutig ablesen. Die beiden Methoden Eco-Indicator 99 und CML 1992 beruhen auf einem ähnlichen Ansatz und zeigen beide eine stärkere Umweltbelastung durch die Variante Diesel. Diese Aussage wird aber durch die Methode Ökologische Knappheit 1997 nicht unterstützt.

### 5.3 Alternativ-Varianten Ökologie

Wie bereits beim Beschrieb der Varianten in Kapitel 4.1 erwähnt wird, bestehen für den Trolley- und den Gasbus verschiedene Alternativen bezüglich Antriebsmittel. Beim Gasbus kann neben den verschiedenen Produkten, die zur Auswahl stehen, auch die Situation des Biogasmarktes variiert werden.

Sensitivitäten bezüglich alternativer Antriebsmittel

Es werden deshalb folgende drei Alternativ-Varianten betrachtet:

Varianten „Trolley-Wasserkraft“, „Biogas 2002“ und „Erdgas“

- „Trolley - Wasserkraft“: Der Trolleybus wird anstelle von UCPT-Strom mit Strom aus Schweizer Wasserkraft betrieben.
- „Biogas 2002“: Ein Szenario für die Situation 2002 macht Gutschriften für die Entlastung alternativer Entsorgungswege biogener Abfälle, weil in der heutigen Situation bei grösserer Nachfrage nach Produkten der Vergärung mehr biogenes Material vergärt wird und somit andere Verwertungsarten entlastet werden.
- „Gasbus - Erdgas“: Der Gasbus wird anstelle von Biogas mit herkömmlichem Erdgas betrieben.

In Abbildung 12 wird die Sachbilanz und in Abbildung 13 die Wirkungsbilanz für die drei Grundvarianten und die drei alternativen Varianten dargestellt und anschliessend diskutiert.

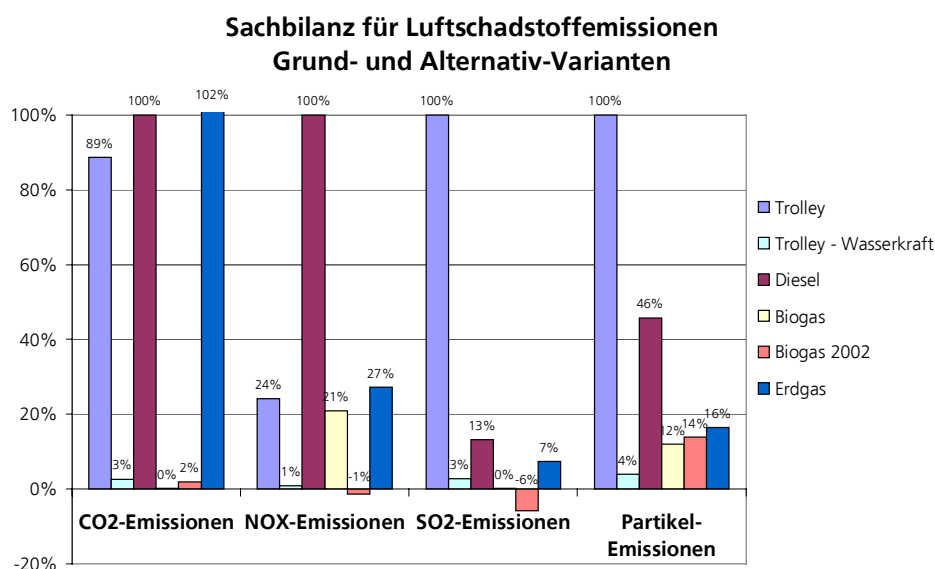
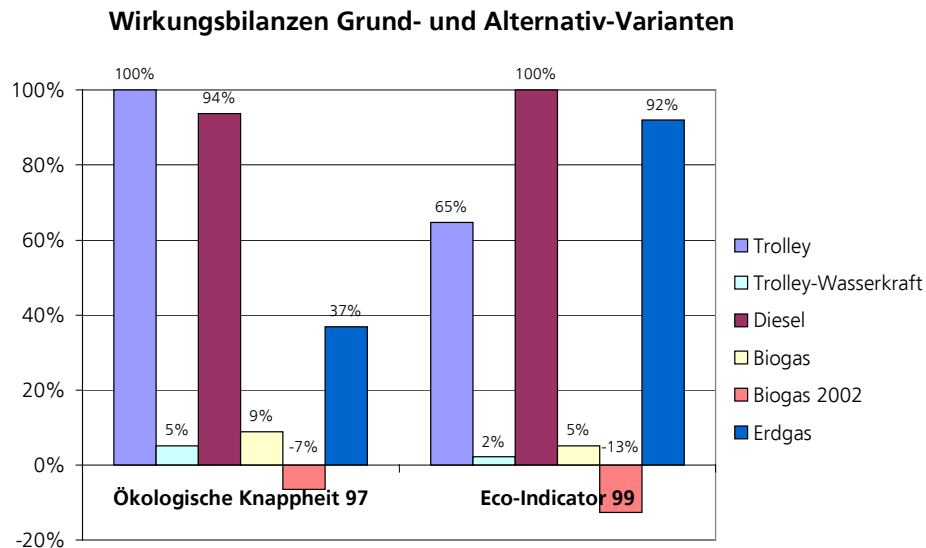


Abbildung 12:  
Sachbilanz mit alternativen  
Varianten

Abbildung 13:  
Wirkungsbilanz nach  
Ökologischer Knappheit und  
Eco-Indicator für alternative  
Varianten



#### Allgemeine Aussagen

Aus den Sach- und Wirkungsbilanzen lassen sich für die Alternativ-Varianten folgende Aussagen ableiten:

- Der Trolleybus mit Wasserkraftstrom schneidet in allen Bereichen sehr gut ab, die Unterschiede zum Trolley mit herkömmlichem Strommix, Dieselfbus und Erdgasbus sind gross.
- In der heutigen Situation des Biogasmarktes (Marktentwicklung noch möglich) bewirkt der mit Biogas betriebene Gasbus eine Verbesserung der Umweltbelastung und weist deshalb in der Wirkungsbilanz negative Zahlen auf (Biogas 2002).
- Die Beurteilung des mit Erdgas betriebenen Gasbusses variiert stark. Die schlechte Beurteilung nach Eco-Indicator wird hauptsächlich durch den Ressourcenverbrauch (Rohgas) bestimmt (78% von 92%). Tendenziell ist seine Umweltbelastung kleiner als die des Dieselfbusses.

#### Besprechung der Alternativ-Variante „Trolley – Wasserkraft“

Die gute Bewertung der Alternativ-Variante Trolley - Wasserkraft mag im ersten Augenblick erstaunen, da die Stauseen und Flusskraftwerke als deutliche Eingriffe in die Natur wahrgenommen werden. Laut dem Ökoinventar für Energiesysteme [10] gelten Wasserkraftwerke zwar als materialintensiv, verursachen aber wegen der langen Nutzungsdauer wesentlich tiefere Emissionen als andere Energiesysteme.

#### Hydrologisch-biologische Effekte nicht quantifizierbar

Eine wesentliche Umweltbeeinflussung sind aber die hydrologischen Veränderungen, welche durch den Kraftwerksbetrieb verursacht werden. Diese hydrologisch-biologischen Effekte sind äusserst vielfältig und komplex, was eine Quantifizierung sehr schwierig macht. Auch im Ökoinventar für Energiesysteme [10], welches die Grundlage für obenstehende Auswertungen bildet, konnten diese Effekte nur ansatzweise berücksichtigt werden. Die sehr guten Resultate der Variante Trolley – Wasserkraft müssen deshalb etwas relativiert werden.



Der Verein für umweltgerechte Elektrizität (VUE) verleiht denn auch an konventionelle Wasserkraftwerke nur die Basisvariante *naturemade basic* (Strom aus erneuerbaren Quellen) des zweistufigen Qualitätszeichens *naturemade*. Nur Wasserkraftwerke, die strenge ökologische Auflagen erfüllen, erhalten das eigentliche Ökostromlabel *naturemade star* [29]. Die erwähnten Umweltprobleme können durch den Bezug von öko-zertifizierten Stromprodukten vermindert werden.

*naturemade star*-zertifizierter Strom als Alternative

Im vorliegenden Bericht wird unter „Strom aus Wasserkraft“ herkömmlicher Strom aus Wasserkraft verstanden.

Die negativen Werte der Umweltbelastung der Alternativ-Variante Biogas 2002 bedeuten, dass in der heutigen Situation die Nachfrage und Nutzung von Biogas positive Umwelteffekte zeigt, weil dadurch grössere Umweltbelastungen über andere Verwertungswege vermieden werden. Heute verursacht die Nachfrage nach Biogas eine Verschiebung von der Kompostierung bzw. der Verbrennung in der KVA hin zur Vergärung. Die Vergärung schneidet gemäss einer Ökobilanz [13] wesentlich besser ab als die anderen Entsorgungsarten.

Besprechung der Alternativ-Variante „Gasbus 2002“

Eine abschliessende Beurteilung der Alternativ-Variante „Erdgas“ kann nicht gemacht werden, weil die beiden Bewertungsmethoden unterschiedliche Resultate liefern, welche gegenüber den Varianten Trolley und Diesel z.T. nur kleine Unterschiede zeigen. Eine Analyse lokaler vs. globaler Auswirkungen könnte z.B. weitere Hinweise geben. Weil diese Variante nicht im Vordergrund der Studie steht, wird nicht weiter darauf eingegangen.

Besprechung der Alternativ-Variante „Gasbus - Erdgas“

## 6 Wirtschaftlichkeit

### 6.1 Die Wirtschaftlichkeit der Grundvarianten

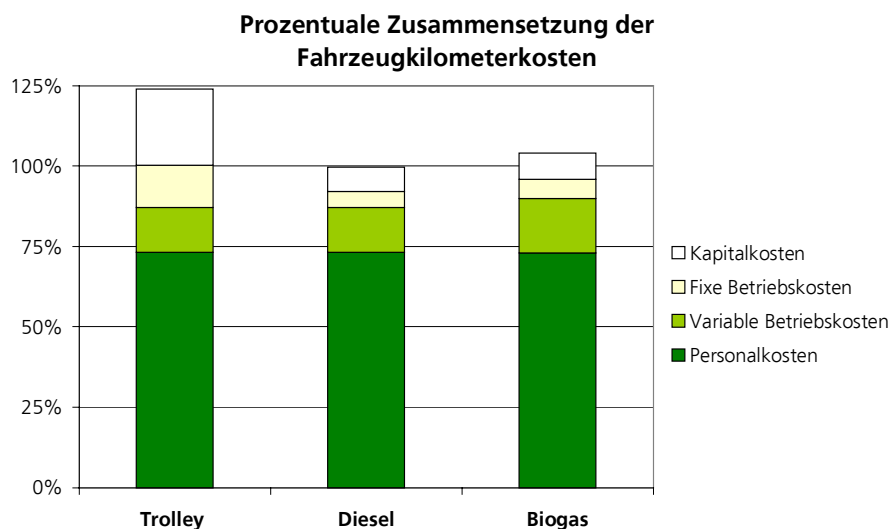
Die Kosten der drei Antriebsarten Diesel, Trolley und Biogas wurden anhand der in Kapitel 2, 3 und 4 beschriebenen Parameter und Annahmen pro km berechnet. Im Anhang A3 und A5 sind die Berechnungsgrundlagen dargestellt und nach Kostenarten detailliert ausgewiesen. Die folgende Tabelle zeigt die Kostenarten in Franken pro Fahrzeugkilometer:

Kostenarten	Diesel	Trolley	Gas
Fixe Betriebskosten	0.41	0.94	0.45
Variable Betriebskosten	1.04	1.05	1.25
Personalkosten Chauffeure	5.45	5.45	5.45
Investitions- und Kapitalkosten	0.55	1.77	0.59
<b>Totalkosten der Variante</b>	<b>7.45</b>	<b>9.21</b>	<b>7.75</b>

Tabelle 3:  
Kosten pro Fahrzeugkilometer

Die Personalkosten für die Fahrer sind der grösste Kostenblock und bei allen Varianten identisch. Die fixen Betriebskosten sowie die Investitionskosten sind beim Trolleybus am höchsten, die variablen Betriebskosten sind es beim Gasbus. Insgesamt generiert die Trolleyvariante Mehrkosten gegenüber dem Diesel von knapp CHF 300'000.- pro Jahr oder 24%. Umgerechnet sind das CHF 1.76 pro gefahrenem Kilometer. Wenn die Fahrerkosten nicht berücksichtigt werden, ist die Trolleyvariante um 88% teurer. Die Gasvariante ist gegenüber dem Dieselbus 4% teurer. Dies entspricht Mehrkosten von gut CHF 49'000.- pro Jahr oder CHF 0.30 pro Kilometer. Schliesst man auch hier die Fahrerkosten aus der Analyse aus, so ist der Gasbus um 15% teurer. Die relative Zusammensetzung der Kosten (Diesel = 100%) stellt sich wie folgt dar:

Abbildung 14:  
Prozentuale Zusammensetzung  
der Kilometerkosten, normiert  
auf 100% der Dieselskosten



Im Folgenden soll dargestellt werden, auf welche Kernfaktoren diese unterschiedliche Kostenstruktur zurückzuführen ist. Es wird dabei der Dieselbus als Referenz genommen und die Abweichungen von Trolley- und Biogasbus im Bezug auf die Dieselvariante begründet.

### Fixe Betriebskosten

Fixe Betriebskosten

Fixe Betriebskosten sind Kosten für Gebäudeunterhalt, Infrastruktur und Kapitalkosten für Werkstatt und Depot, sowie Personalkosten Technik. Die Mehrkosten des Trolleybusses von 130% sind wie folgt begründet:

- Erhöhte Personalkosten Technik
- Erhöhte Infrastruktur Wertstatt
- Unterhaltskosten für die Fahrleitung

Die folgenden Gründe führen bei der Gas-Variante zu 10% höheren fixen Betriebskosten gegenüber der Diesel-Variante:

- Erhöhte Personalkosten Technik (zusätzliche, neue Gastechnologie)

- Sicherheitsüberprüfung der Gasflaschen

### Variable Betriebskosten

Variable Betriebskosten beinhalten Treibstoff- respektive Stromkosten, Versicherungen und Gebühren (variabel), Bereifungskosten, Reinigungs- und Verbrauchsmaterial, Ersatzteile/ Fremdleistungen, variable Personalkosten Technik. Bei der Gas- und der Diesel-Variante sind zusätzlich Personalkosten des Betankungsprozesses sowie Schmierstoffe zu berücksichtigen. Diesel- und Trolleybus haben gleich hohe variable Betriebskosten. Dies ist auf folgenden Fakten begründet:

Variable Betriebskosten

- Die Treibstoffkosten sind mit CHF 0.30 pro km bei beiden gleich hoch.
- Beim Trolley sind Versicherungen, Verbrauchsmaterial, Schmierstoffe und Ersatzteile günstiger.
- Der Motor des Trolleybus ist wartungsfreundlicher als derjenige des Dieselbusses und es entfällt der Aufwand für die Wartung der Abgasfilter.
- Grösser ist hingegen der Aufwand für die Wartung der Elektronik und der Mechanik des Stromabnehmers.

Der Biogasbus schneidet bei den variablen Betriebskosten um 20% teurer ab als die beiden anderen Antriebsvarianten. Dies ist in erster Linie auf 50% höhere Treibstoffkosten zurückzuführen. Darin enthalten sind auch Investitions- und Betriebskosten der Erdgastankstelle. Berechnungen über die Treibstoff-, Investitions- und Betriebskosten der Gastankstelle sind im Anhang A5 im einzelnen nachgewiesen. Ebenfalls teurer sind beim Gasbus die variablen Personalkosten Technik aufgrund des etwas erhöhten Wartungsbedarfs für die Magermotoren der Gasbusse.

### Personalkosten Fahrer

Personalkosten Fahrer

Die Kosten für Löhne und Sozialleistungen der Fahrer bilden bei allen Antriebsvarianten mit CHF 5.45 pro Fahrzeugkilometer denselben und auch den bei weitem grössten Wert. Anteilsmässig sind das beim Diesel 73%, beim Gasbus 70% und beim Trolleybus 60% der Gesamtkosten.

### Investitionskosten

Die Beschaffung von zweiachsigen Trolleybussen ist teuer, da diese kaum noch hergestellt werden. Die quasi Einzelanfertigung dieser Wagen kostet CHF 1 Mio. pro Stück gegenüber dem Dieselfahrzeug mit Kosten von CHF 0.33 Mio. pro Stück (inklusive Partikelfilter). Aufgrund der längeren Abschreibedauer von Trolleybussen sinkt der Restwert nach 12 Jahren beim Trolley auf CHF 335'000.- und beim Diesel auf CHF 47'000.-. Ein moderner Gasbus mit Magermotortechnologie kostet heute ca. 10% mehr als ein gleichwertiger Dieselbus. In diesem Preis eingeschlossen sind die Gasdruck-

Investitionskosten Busse

behälter, die auf dem Dach montiert sind. Die Abschreibungsdauer des Gasbusses ist analog dem Dieselbus.

Investitionskosten Fahrleitung	Die bestehende Fahrleitung auf der Linie 4 ist in einem schlechten Zustand und muss bis auf die Pylone total saniert werden. Dies verursacht Investitionskosten von ca. CHF 1.35 Mio. In dieser Zahl ist berücksichtigt, dass auf einem Teil der Strecke bereits Trolleybusse verkehren und deshalb nicht die gesamten 4.7 km neu gebaut werden müssen. Die Fahrleitung wird über 25 Jahre linear abgeschrieben und hat somit nach 12 Jahren noch einen Restwert von CHF 0.7 Mio.
Investitionskosten Gastankstelle	Die Investitionskosten für die Gastankstelle sind im Gaspreis eingerechnet. Sie erscheinen also nicht unter Investitionen, sondern in den variablen Kosten. Die in die Treibstoffkosten eingerechneten Investitionskosten für die Betankungsanlage betragen CHF 0.26 pro kg Gas und damit bei einem Verbrauch von 0.375 kg pro km: CHF 0.10 pro Fahrkilometer.
Desinvestitionskosten Fahrleitungsrückbau	Falls man sich für die Gas- oder die Dieselvariante entscheidet, würde die noch bestehende, jedoch nicht mehr funktionsfähige Fahrleitung wohl definitiv demontiert werden. Die daraus entstehenden Kosten belaufen sich auf ca. CHF 0.2 Mio. Diese Kosten werden den beiden Varianten angerechnet.
Gesamtbetrachtung Investitionen	Werden die totalen Investitionskosten betrachtet, wird ersichtlich, dass der hohe Investitionsbedarf der Trolleybus-Variante das wirtschaftliche Bild bestimmt und mit Mehrkosten gegenüber dem Diesel von CHF 1.22 pro Fahrzeugkilometer für 70% der Mehrkosten des Trolleybusses verantwortlich ist. Die Mehrinvestitionen der Gasvariante gegenüber der Dieselvariante betragen CHF 0.14 pro km, knapp die Hälfte der Mehrkosten der Gasvariante.

## 6.2 Wirtschaftlichkeit der Alternativ-Varianten

Trolley mit Strom aus Wasserkraft	Aus Kostensicht wurde in der Grundvariante Trolley davon ausgegangen, dass für die Linie 4 der zur Zeit von den Winterthurer Verkehrsbetrieben verwendete konventionelle Strom benutzt wird. Bei Verwendung von ökologisch vorteilhafterem Wasserkraftstrom, wie ihn die Winterthurer Stadtwerke (Swiss Power) schon bald für einen Aufpreis von ca. CHF 0.02 pro kWh anbieten werden, erhöhen sich die Kosten unwesentlich um 0.4%. Wenn zertifizierter Ökostrom eingesetzt werden soll, bietet sich das geplante Stromlabel „Star“ der Swiss Power an, welches Mehrkosten von ca. CHF 0.12 pro kWh Strom verursachen würde. Dies würde zu einer Steigerung der Gesamtkosten des Trolleybusses von 2.6 % führen. Im folgenden wird unter „Strom aus Wasserkraft“ herkömmlicher Strom aus Wasserkraft verstanden und mit dessen Aufpreis von CHF 0.02 pro kWh gerechnet (vgl. dazu Kapitel 5.3).
--------------------------------------	--

Es wird angenommen, dass die Wahl des Szenarios der Biogasherstellung keinen Einfluss auf die Kosten hat. In beiden Fällen wird mit dem derzeitigen Biogaspreis gerechnet. Die Entwicklung des Biogaspreises hängt von vielen Faktoren ab, die ähnlich auch auf die Preise der anderen Energieträger wirken (technologische Entwicklung, Verknappung der Energieressourcen, Steuern, politische Einschätzung der negativen Auswirkungen eines Energieträgers etc.).

Biogas 2002

Der Einsatz von Erdgas an stelle von Biogas ist aus technischer Sicht keine Umstellung, da dasselbe Gas aus demselben Netz bezogen wird. Finanziell unterscheidet sich Erdgas von Biogas durch die Treibstoffsteuern, die sich auf CHF 809.2 pro 1000 kg Erdgas, abzüglich CHF 629.2 Rückerstattung, also netto 180.- pro 1000 kg Erdgas belaufen. Dies verteuert die Erdgas-Variante im Vergleich zur Biogas-Variante um CHF 0.07 pro km oder um 1%. Gegenüber der Diesel-Variante ist der Erdgasbus 5% teurer.

Erdgas

### 6.3 Sensitivitätsanalyse Wirtschaftlichkeit

Zur Verifizierung der Stabilität der erzielten Resultate wurden alle wichtigen Einflussgrößen untersucht, die sich im Verlauf der Zeit verändern könnten und sich auf die drei Grundvarianten unterschiedlich auswirken.

Unter der Annahme, dass der Betrachtungshorizont eine zeitliche Grenze markiert, nach dessen Ablauf die Situation wieder neu beurteilt wird, ist es interessant zu sehen, wie sich das Resultat verändert, wenn die gesamten Investitionskosten für die Busse, die Gastankstelle und die Fahrleitung über den Betrachtungshorizont von 12 Jahren abgeschrieben werden. Die Umwelteffekte dieses Szenarios sind gleich wie bei der Grundvariante. Die Situation bei den Kosten verhält sich jedoch wie folgt:

#### Sensitivitätsanalyse 1:

Abschreibung der  
Investitionskosten auf 12 Jahre

Kostenarten	Diesel	Trolley	Gas
Fixe Betriebskosten	0.41	0.94	0.45
Variable Betriebskosten	1.04	1.05	1.25
Personalkosten Chauffeure	5.45	5.45	5.45
Investitions- und Kapitalkosten	<b>0.59</b>	<b>2.29</b>	<b>0.63</b>
<b>Totalkosten der Variante</b>	<b>7.49</b>	<b>9.73</b>	<b>7.79</b>

Tabelle 4:  
Kostenvergleich bei 100%  
Amortisation innerhalb von 12  
Jahren

Die Trolleyvariante ist mit einem Zuschlag von CHF 0.52 pro km von diesem Szenario aufgrund der hohen Investitionskosten viel stärker betroffen als die Diesel- und die Gasbus-Variante mit einem Zuschlag von je CHF 0.04. Die Mehrkosten des Trolleybusses gegenüber der Dieselvariante steigen dadurch von 24% auf 30%, der Gasbus bleibt 4% teurer.

Dieser Kosteneffekt durch Verkürzung der Abschreibungsdauer entspricht recht genau den Auswirkungen, die eine Erhöhung des Kapitalkostensatzes von 5% auf 8% im Grundszenario hätte.

Erhöhung des  
Kapitalkostensatzes

**Sensitivitätsanalyse 2:**Einführung einer CO<sub>2</sub>-Steuer

Im Basisszenario wurde bei der Dieselvariante von derzeitigen Dieselpreisen von CHF 0.75 pro Liter für „Greendiesel“ ausgegangen. Das CO<sub>2</sub>-Gesetz, mit welchem der Bund ab 2004 bei Nichterreichung der Schweizerischen CO<sub>2</sub>-Ziele eine Abgabe auf CO<sub>2</sub> einführen kann, sieht einen maximalen Zuschlag von 210 Fr. pro Tonne CO<sub>2</sub> vor. Auf Diesel umgerechnet beträgt der maximale Zuschlag CHF 0.55/l. Experten schätzen einen Zuschlag von CHF 0.2/l für Privatverbraucher als realistisch ein. Es stellt sich jedoch die Frage, ob und in welchem Ausmass die Steuer auch auf den öffentlichen Verkehr angewandt wird. Wir gehen in der folgenden Rechnung von CHF 0.2/l aus. Der indirekte Einfluss auf den Strompreis ist schwieriger abzuschätzen: der praktisch CO<sub>2</sub>-freie Schweizer Strom fällt nicht unter das CO<sub>2</sub>-Gesetz und im EU-Raum bestehen noch keine derartigen Gesetze. Wir gehen deshalb davon aus, dass sich die Strompreise mit der Einführung der CO<sub>2</sub>-Steuer nicht verändern werden. Für die Variante Diesel zeigt sich folgendes Bild:

Tabelle 5:  
Kostenvergleich bei einer CO<sub>2</sub>-  
Steuer auf Dieseldieselkraftstoff

<b>Kostenarten</b>	<b>Diesel</b>	<b>Trolley</b>	<b>Trolley</b>
Fixe Betriebskosten	0.41	0.94	0.45
Variable Betriebskosten	<b>1.12</b>	1.05	1.25
Personalkosten Chauffeure	5.45	5.45	5.45
Investitions- und Kapitalkosten	0.55	1.77	0.59
<b>Totalkosten der Variante</b>	<b>7.53</b>	<b>9.21</b>	<b>7.75</b>

Der Dieselpreis würde durch die Einführung einer CO<sub>2</sub>-Steuer um rund CHF 0.2 pro Liter zunehmen. Dies bewirkt eine Zunahme der Kilometerkosten um CHF 0.08 beim Dieselfahrzeug. Der Kostenvorteil des Diesels schwächt sich dadurch gegenüber dem Trolley unwesentlich von 24% auf 22% ab, gegenüber dem Gasbus von 4% auf 3%. Biogas ist CO<sub>2</sub> neutral und ist von einer Steuer zur Reduktion der Treibhausgase nicht betroffen. Erdgas ist von der CO<sub>2</sub>-Steuer ebenfalls betroffen so dass sich die Kostenverhältnisse zwischen Diesel und Erdgas kaum verändern.

**Sensitivitätsanalyse 3:**

Liberalisierung des Strommarktes

Im Basisszenario wurde vom derzeitigen Strompreis ausgegangen. Dieser liegt für konventionellen Strom bei CHF 0.15 pro kWh. Mit der Öffnung des Strommarktes kann von einer Senkung dieses Preises insbesondere für Grossverbraucher ausgegangen werden. Unter der Annahme, dass der Strompreis durch die Liberalisierung um 20% auf CHF 0.12 pro kWh sinkt, reduziert sich der Kilometerpreis des Trolleybusses um CHF 0.06 pro km, womit sich folgendes Bild ergibt:

Tabelle 6:  
Kostenvergleich bei einer  
Reduktion des Strompreises um  
20% (Liberalisierung des  
Strommarktes)

<b>Kostenarten</b>	<b>Diesel</b>	<b>Trolley</b>	<b>Gas</b>
Fixe Betriebskosten	0.41	0.94	0.45
Variable Betriebskosten	1.04	<b>0.99</b>	1.25
Personalkosten Chauffeure	5.45	5.45	5.45
Investitions- und Kapitalkosten	0.55	1.77	0.59
<b>Totalkosten der Variante</b>	<b>7.45</b>	<b>9.15</b>	<b>7.75</b>

In diesem Szenario reduzieren sich die Mehrkosten des Trolleybusses gegenüber dem Dieselbus marginal von 24% auf 23%.

Obige Sensitivitätsanalysen zeigen, dass das in der Grundvariante errechnete Verhältnis der Kosten zwischen Diesel- und Trolleybus durch Veränderung der wichtigsten Variablen nur wenig beeinflusst wird. In die Mehrkosten des Trolleybusses schwanken zwischen 22 und 30%. Der Gasbus ist ebenfalls konstant 3-4% teurer.

Marginale Sensitivität der Kosten

## 7 Vergleich Umweltbelastung – Kosten

In diesem Kapitel werden die Resultate der Kapitel 6 und 7 zusammengeführt und in sogenannten Öko-Effizienz-Diagrammen dargestellt.

### 7.1 Öko-Effizienz der Grundvarianten

Durch die Gegenüberstellung von Wirtschaftlichkeit und Umweltbelastung ergibt sich für die drei Grundvarianten das folgende Bild:

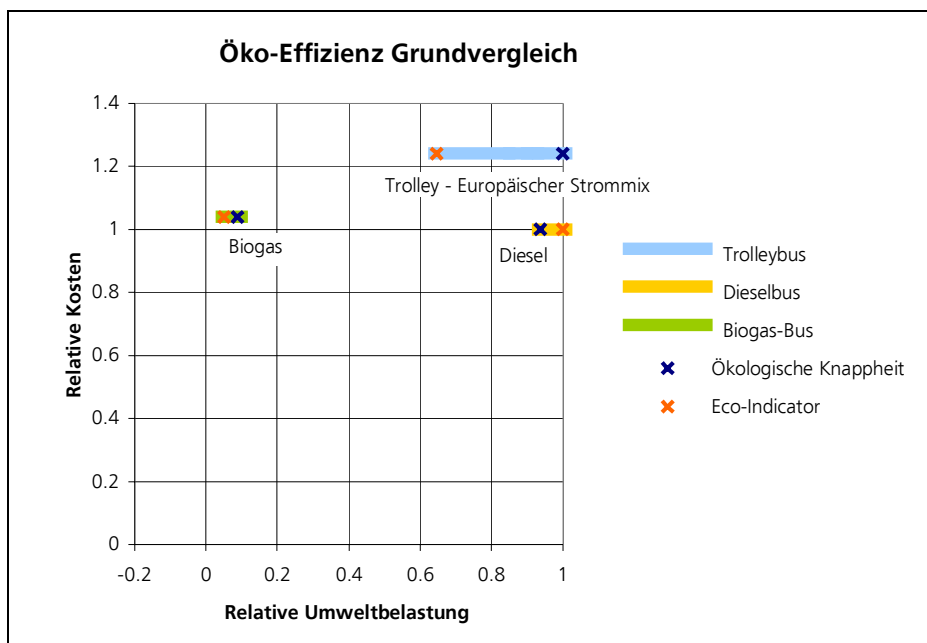


Abbildung 15:  
Öko-Effizienz-Diagramm des  
Grundvergleichs

Aus oben stehender Grafik geht hervor, dass die Variante Biogas mit 3-5% (je nach CO<sub>2</sub>-Steuersatz auf Diesel) nur unwesentlich teurer ist als die Variante Diesel, innerhalb der gewählten Systemgrenzen jedoch um ca. 90% reduzierte Umweltbelastungen mit sich bringt. Die Variante Biogas zeigt damit mit Abstand die beste Öko-Effizienz. Die Variante Trolley ist um etwa 20% teurer und reduziert die Umweltbelastungen gegenüber dem Diesel-

Beste Öko-Effizienz für die  
Variante Biogas

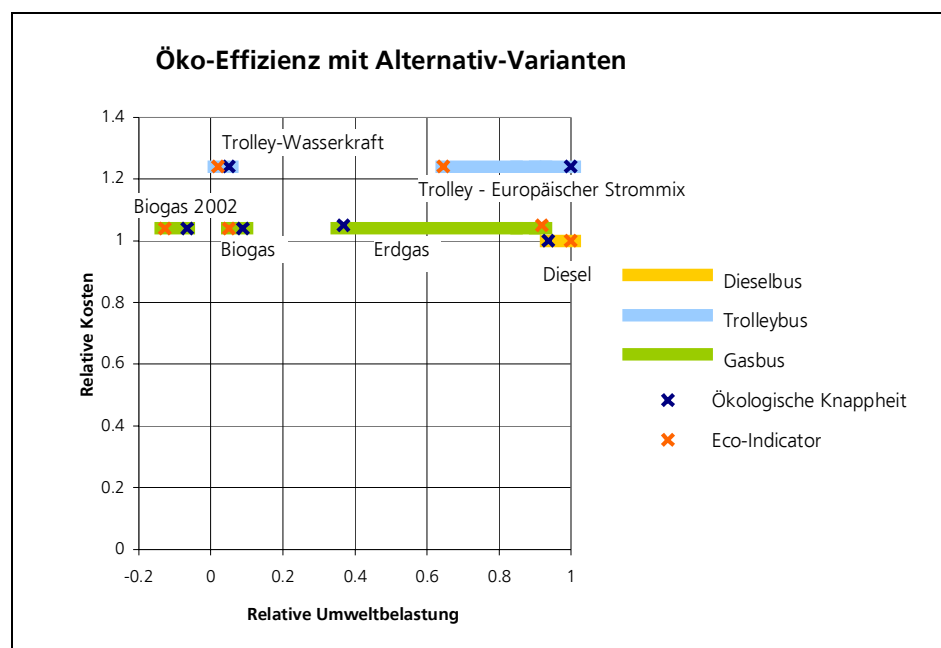
bus um 0-35%. Der grosse Schwankungsbereich der Umweltbelastungen wird in Kapitel 6.2 beschrieben.

## 7.2 Öko-Effizienz der Alternativ-Varianten

Andere Umweltauswirkungen  
bei gleichen Kosten

Die Analyse der Alternativ-Varianten ergeben keine signifikante Veränderung der Kostenstruktur im Vergleich zu den Grundvarianten, die Umweltauswirkungen zeigen aber starke Änderungen. Ein mit Biogas betriebener Gasbus (Biogas 2002) erreicht heute dank der Auswirkungen auf die Grüngut-Entsorgungssituation sogar eine positive Umweltbilanz. Auch der mit Wasserkraftstrom betriebene Trolleybus weist sehr kleine Umweltbelastungen aus. Der Erdgasbus hingegen ist sowohl ökologisch wie ökonomisch nicht optimal. Im Öko-Effizienz-Diagramm präsentiert sich dies folgendermassen:

Abbildung 16:  
Öko-Effizienzdiagramm mit den  
Alternativ-Varianten



Der Biogas-Bus hat die beste  
Öko-Effizienz

Das Diagramm kann folgendermassen interpretiert werden: Ein mit Strom aus Wasserkraft betriebener Trolleybus ist bei gleicher Umweltbelastung etwa 20% teurer als ein mit Biogas betriebener Gasbus. Der Biogasbus erreicht gegenüber dem Dieselbus eine um 80-95% geringere Umweltverschmutzung bei nur sehr kleinen Mehrkosten. Diese Variante hat die beste Öko-Effizienz.

## 7.3 Sensitivitäten

Basierend auf den drei Hauptvarianten wurden Sensitivitäten bezüglich der grössten Kostenfaktoren gerechnet, in denen sich die drei Antriebsvarianten unterscheiden und die mit Unsicherheit behaftet sind. Es sind dies: Ab-



schreibungshorizont, Kapitalkosten, Energiepreise, Steuer- und Emissionsgesetze. Es zeigt sich, dass das in der Grundvariante errechnete Verhältnis der Kosten zwischen Diesel- und Trolleybus sehr stabil ist und durch die Veränderung der wichtigsten Variablen nur wenig beeinflusst wird. Die Mehrkosten des Trolleybusses schwanken zwischen 22 und 30%. Der Gasbus ist immer 3-4% teurer als der Dieselbus.

#### 7.4 Öko-Effizienz im nationalen und internationalen Vergleich

Für die beiden Alternativ-Varianten „Biogas 2002“ und „Trolley-Wasserkraft“, welche gegenüber der Variante „Diesel“ eine deutlich bessere Öko-Effizienz haben, wird ein Vergleich mit nationalen und internationalen Projekten gemacht.

Gegenüber der Variante Diesel können mit beiden Alternativ-Varianten ca. 180 t CO<sub>2</sub> / a und 1.2 t NO<sub>x</sub> / a eingespart werden. Dabei entstehen Mehrkosten von ca. CHF 300'000.- pro Jahr für „Trolley-Wasserkraft“ und von ca. CHF 50'000 / Jahr für „Biogas 2002“.

Schadstoff-Einsparungen und Kosten gegenüber Variante Diesel

Werden die Kosten auf *einen* Stoff bezogen, würden sich folgende Kosten für die Reduktion der beiden Schadstoffe ergeben:

Kosten der Reduktion von 1 Tonne	NO <sub>x</sub> [CHF/t]	CO <sub>2</sub> [CHF/t]
Trolley – Wasserkraft	250'000	1660
Biogas 2002	41'600	278

Tabelle 7:  
Kosten der NO<sub>x</sub>- und CO<sub>2</sub>-Reduktion

Es zeigt sich, dass die Variante Biogas die Umweltbelastung um einen Faktor 6 effizienter reduziert als die Trolley-Wasserkraft-Variante. Die Einsparungskosten sind verglichen mit anderen Massnahmen im Kanton Zürich in der Trolley-Wasserkraft-Variante hoch und in der Biogas-Variante im mittleren Bereich, wie die Vergleichswerte in Tabelle 8 zeigen:

Tabelle 8  
Kosten und Wirksamkeit  
verschiedener Luftreinhalte-  
massnahmen im Kanton Zürich  
[30]

Massnahmen im Kanton Zürich	Kosten der NO <sub>x</sub> Reduktion [CHF/t]	Kosten der CO <sub>2</sub> Reduktion [CHF/t]
Sanierung Heizungen	-11'300	-54
Lenkungsabgabe von CHF 1.- / Liter	24'400	103
Entstickungsanlage KVA	15'555	0
Low NO <sub>x</sub> -Triebwerke für Flugzeuge	18'300	n.a.
Abgabe auf Beschäftigtenparkplätzen von CHF 3.- pro Tag	91'900	227
Verbrauchsabhängige Heizkostenab- rechnung	323'100	140
Temporeduktion in Quartierstrassen	126'700	n.a.
Wärmepumpen	708'300	293
Gebäudeisolationen aussen	1'500'000	660
Subventionierung von Low NO <sub>x</sub> Feue- rungen durch die Stadt Winterthur	72'900	n.a.

Internationale Öko-Effizienz

Im Rahmen der flexiblen Mechanismen des Kyoto-Protokolls werden heute Projekte in Entwicklungsländern und den GUS finanziert, welche zum Ziel haben, die weltweit wirkenden umweltbelastenden Stoffe, insbesondere CO<sub>2</sub>, mit einer globalen Umwelteffizienz zu reduzieren. Dafür werden die sehr viel tieferen Kosten von gleichwertigen Umweltschutzmassnahmen in Entwicklungsländern und den GUS ausgenützt. Bei solchen Projekten werden CO<sub>2</sub>-Einsparungen mit Kosten von 7-30 Franken pro Tonne eingespartes CO<sub>2</sub> erzielt. Auf Grund der sehr viel höheren Öko-Effizienz der Investitionen im Ausland ist aus einer globalen Sicht zu erwägen, die Mehrkosten der Gas- respektive der Trolleyvariante einzusparen, die Dieselvariante zu wählen und statt dessen in ein Umweltschutzprojekt im Ausland zu investieren.

## 8 Weitere Beurteilungskriterien

Lärmemissionen

Die Lärmemissionen von Dieselnissen waren früher deutlich höher als die von Trolleybussen (vgl. z.B. [1]), sind aber erfreulicherweise in den letzten Jahren stark reduziert worden. Lärmmessungen bei Gasbussen von Betreibern [17] deuten auf etwa gleich grosse Lärmemissionen wie beim Trolleybus. Von Seiten der Hersteller stehen keine abgesicherten Angaben über Lärmemissionen zur Verfügung. Basierend auf diesen Grundlagen können keine signifikanten Unterschiede in der Lärmbelastung angenommen werden. Somit kann der Faktor Lärm nicht zur Entscheidungsfindung beitragen.

Insbesondere bei an Wohn- oder Arbeitsgebäuden befestigten Fahrleitungen und nahe an Häusern gelegenen Fahrbahnen ist das Auftreten von Elektrosmog ein Thema. In der Schweiz geht man davon aus, dass der Elektrosmog der Fahrleitungen keine messbaren Effekte auf Gesundheit und Wohlbefinden von Menschen hat. Da die Fahrleitungen mit Gleichstrom betrieben werden, sind Probleme mit Elektrosmog aus technischer Sicht wenig wahrscheinlich (statische, elektrische Felder sind weniger gefährlich als wechselnde Felder). In Winterthur war Elektrosmog von Fahrleitungen bisher kein Thema. So kommt es stark auf die subjektive Wahrnehmung der Anwohner an, ob die Fahrleitungen als störend empfunden werden.

Elektrosmog/ Fahrleitungen

Die Kriterien der gesellschaftlichen Akzeptanz von Bussen sind Wirtschaftlichkeit, Umweltschutz, Gesundheit, Lärmbelastung, Sicherheit, Zuverlässigkeit und Erscheinungsbild der Stadt.

Gesellschaftliche Akzeptanz

- Der Gasbus ist bis anhin wenig bekannt. Ein Biogasbus, als Verwerter von Abgasen aus den Grünabfällen Winterthurs erfüllt obige Kriterien weitgehend. Er schliesst Stoffkreisläufe auf eine anschauliche Weise. Kampagnen wie „Salat im Tank“ wären innovativ und würden eine aktive, prägnante Neupositionierung der Stadt und der Verkehrsbetriebe ermöglichen. Der Biogasbus hat somit, wenn mit einer begleitenden Kampagne eingeführt, bezüglich Image ein sehr grosses Potenzial und damit gegenüber den anderen Varianten einen klaren Vorteil.
- Durch den technischen Fortschritt haben die Dieselbusse ihr eher negatives Image bezüglich Umweltschutz, Gesundheit, Lärmbelastung und Wirtschaftlichkeit in der jüngsten Vergangenheit stark verbessert.
- Die Trolleybusse gelten traditionell als sauber und ruhig. Durch die heute bestehenden alternativen Technologien Diesel und Gas und die zunehmend globale Betrachtung von Umweltbelastungen wird diese Position stark bedrängt.

Grundsätzlich sind Diesel- und Gasbusse im täglichen Einsatz flexibler als Trolleybusse. Sie können bei Umleitungen und anderen unvorhergesehenen Ereignissen kurzfristig ausgetauscht und die Fahrtrouten abgeändert werden, während der Trolleybus an die Fahrleitung gebunden ist. Aufgrund der bestehenden grossen Busflotte ist jedoch im betrieblichen Alltag der Winterthurer Verkehrsbetriebe eine grosse Flexibilität vorhanden, welche diese Nachteile des Trolleybusses etwas ausgleicht. Die Einführung einer zusätzlichen Technologie verursacht in gewissen Bereichen des Betriebs Mehraufwand aufgrund der erhöhten Diversität des Fahrzeugparks (Planung, Betankung, Schulung, Unterhalt etc.).

Betriebsablauf

Wird eine 2 Millionen teure Investition über 20 Jahre abgeschrieben, sind die Kosten pro Jahr rein rechnerisch gleich hoch wie wenn eine 1 Million teure Investition über 10 Jahre abgeschrieben wird. Allerdings stellt eine auf lange Zeit bindende Investition wie es die Trolley-Variante darstellt eine starke Beeinträchtigung der unternehmerischen Flexibilität und ein erhöh-

Bindung an eine langfristige Investition beim Trolleybus

tes Risiko dar, aufgrund des veränderten Umfelds nicht mehr optimale Lösungen anzubieten.

## 9 Schlussfolgerungen und Empfehlung

Aus dem Vergleich der Varianten bezüglich Kosten, ökologischen Auswirkungen und weiteren Beurteilungskriterien können folgende Hauptaussagen gemacht werden:

- Die kostengünstigste Variante ist der Dieselbus. Er schneidet in der ökologischen Betrachtung jedoch schlecht ab.
- Ein mit Biogas betriebener Gasbus schneidet aus ökologischer Sicht sehr gut ab und ist nur unwesentlich teurer als ein Dieselbus (4%). Er weist damit die beste Öko-Effizienz auf. Wenn das Biogas aus Winterthurer Biomasse gewonnen wird, werden Stoffkreisläufe auf anschauliche Weise geschlossen. Dies bietet den Verkehrsbetrieben und der Stadt die Chance, einen zukunftsgerichteten, ökologischen Schritt zu tun, der das Image der Stadt positiv prägt. Ein heute mit Biogas betriebener Gasbus (Biogas 2002) erreicht dank der Auswirkungen auf die Grüngut-Entsorgungssituation sogar eine positive Umweltbilanz.
- Ein mit Erdgas betriebener Gasbus ist etwa gleich teuer wie der mit Biogas betriebene Gasbus, schneidet aber auf der Umweltseite weniger gut ab.
- Ein Trolleybus ist mit Mehrkosten von ca. 24% wesentlich teurer als ein Dieselbus. Der Trolleybus verursacht beim Betrieb keine direkten Schadstoffmissionen und wird deshalb bei einer rein lokalen Sichtweise gegenüber dem Dieselbus bevorzugt. Eine solche „lokal-ökologische“ Sicht ist heute jedoch kaum mehr vertretbar.
- Die globalen Umweltauswirkungen des Trolleybusses sind stark abhängig von der Wahl des Stromprodukts. Unabhängig davon betragen die Mehrkosten gegenüber dem Dieselbus ca. 24%. Wird europäischer Strom gekauft, sind die ökologischen Auswirkungen nicht eindeutig besser als bei einem Dieselbus, was die Mehrkosten nicht rechtfertigt. Wird der Trolleybus hingegen mit Schweizer Wasserkraft-Strom betrieben, so schneidet er aus ökologischer Sicht sehr gut ab und kann so für die Mehrkosten klare Umweltvorteile aufweisen.
- Es ist betriebswirtschaftlich sinnvoll, eine möglichst homogene Fahrzeugflotte mit möglichst ähnlicher Antriebstechnologie anzustreben.

Aus den oben stehenden Aussagen können folgende Empfehlungen abgeleitet werden:

Der Einsatz von Gasbussen ist sowohl aus ökologischer als auch ökonomischer Sicht sehr empfehlenswert, besonders wenn sie mit Biogas betrieben werden. Die Vergärung von biogenen Abfällen ist eine zukunftsfähige Technologie zur Gewinnung erneuerbarer Energie und zur Schliessung lokaler Stoffkreisläufe. Der Einsatz von Gasbussen bietet der Stadt Winterthur eine gute Gelegenheit, ihr Engagement für nachhaltige Lösungen weiterzuführen.

Der Einsatz von Trolleybussen sollte zwingend mit der Verwendung von Wasserkraft-Strom (oder anderer erneuerbarer Energie) gekoppelt werden. Angetrieben durch Strom aus Wasserkraft stehen den 24% jährlichen Mehrkosten gegenüber dem Dieselbus eine bedeutende Reduktion der Umweltbelastung gegenüber. Gegenüber dem Gasbus besteht der Vorteil, dass keine neue Antriebstechnologie eingesetzt werden muss.

## Literaturverzeichnis

- [1] Stadt Winterthur  
Systemvergleich zwischen Trolleybus, Dieselbus und Erdgasbus  
Ernst Basler + Partner AG, 1995
- [2] International Standard. ISO 14040  
Environmental management - Life cycle assessment - Principles and  
framework.  
Geneva. 1997.
- [3] REGIS 2.2, Ökobilanz-Software, sinum AG  
St. Gallen, 28.04.1999
- [4] Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL)  
Schriftenreihe Umweltschutz Nr. 297: Methode der ökologischen  
Knappheit - Ökofaktoren 1997.  
Zürich 1998
- [5] Goedkoop M. und Spriensma R.  
The Eco-indicator 1999  
Amersfoort 2000
- [6] Heijungs R et al.  
Environmental Life Cycle Assessment of Products. Guide and Back-  
grounds  
Leiden. 1992
- [7] ÖBU  
Zuordnung der Ökofaktoren 97 und des Eco-indicator 95 zu Schwei-  
zer Ökoinventaren; Standardisierte und kommentierte Listen  
Zürich, 1998
- [8] Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL)  
Schriftenreihe Umweltschutz Nr. 255: Luftschadstoff-Emissionen des  
Strassenverkehrs 1950-2010, Nachtrag  
Bern, 2000
- [9] INFRAS  
Ökoinventar für Transporte  
Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Transportsystemen  
und für den Einbezug von Transportsystemen in Ökobilanzen (SPP  
Umwelt Modul 5).  
2. korrigierte Auflage, Zürich 1999

- 
- [10] ESU Laboratorium für Energiesysteme (ETH Zürich), PSI Villigen, Forschungsbereich 4: Ökoinventar für Energiesysteme Zürich. 3. Auflage. 1996
  - [11] Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) Handbuch Emissionsfaktoren (Computerprogramm) INFRAS, 1999
  - [12] Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) Ökopprofile von Treibstoffen Umweltmaterialien Nr. 104; Bern, 1998
  - [13] Bundesamt für Energie (BfE) Ökologischer, ökonomischer und energetischer Vergleich von Vergärung Kompostierung und Verbrennung fester biogener Abfallstoffe W. Edelmann, K. Schleiss; November 1999
  - [14] Bundesamt für Energie (BfE) Kompo-Mobil, Biogasnutzung in Fahrzeugen Programm Biomasse, September 1997
  - [15] Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) Gasbusse in Basel, Erfahrungsbericht Schriftenreihe Umwelt-Materialien Nr. 102, Bern 1998
  - [16] Verband öffentlicher Verkehr-Fachtagung „Technik und Betrieb Bus“ 17/18. April 2002, La Chaux de Fonds: Erfahrungen mit CNG-Bussen, Liechtenstein Bus Anstalt, Vaduz; Experiences bus GNC, Transports publics de la région de Lausannoise
  - [17] Transports publics de la région Lausannoise Mesures comparatives des bus à gaz, Rapport FOGA n° 0072 Lausanne, 2002
  - [18] Pelkmans L. et al Emissions and fuel consumption fo natural gas powered city buses versus diesel buses in real-city traffic in „Urban Transport 2001“, 2001
  - [19] Diverse Autoren in Gas Wasser Abwasser (GWA), Ausgabe Juni 2002
  - [20] Verkehrsbetriebe Zürich Facts über Russfilter [http://www.vbz.ch/html/vbz/fahrzeuge/fahrzeuge\\_im\\_einsatz/russfilter.htm](http://www.vbz.ch/html/vbz/fahrzeuge/fahrzeuge_im_einsatz/russfilter.htm) (Stand 29.4.02)

- [21] Fachagentur nachwachsende Rohstoffe (FNR)  
Dichte flüssiger und gasförmiger fossiler Energieträger  
[http://www.dainet.de/fnr/de/Leitfaden/kap3/3\\_2\\_5.pdf](http://www.dainet.de/fnr/de/Leitfaden/kap3/3_2_5.pdf) (Stand August 2002)
- [22] gibgas.de  
Heizwerte verschiedener Kraftstoffe  
<http://www.gibgas.de/german/fakten/preisfindung.html> (Stand August 2002)
- [23] MAN Nutzfahrzeuge Aktiengesellschaft  
Umweltschutz in Fahrt. Saubere Lösungen von MAN.  
Stand April 2002
- [24] MAN Nutzfahrzeuge (Schweiz) AG  
Emissionen von Erdgasmotoren im 13-Stufentest ECE R49  
Mitteilung von Juni 2002
- [25] EvoBus (Schweiz) AG  
Abgaswerte Erdgas CNG Motoren Mercedes-Benz  
Mitteilung vom 13. Juni 2002
- [26] Heinrich, Dr. F; Heinrich, J.  
Mit Erdgas ins 3. Jahrtausend, HAT, Saartal-Linien,  
Saarbrücken 1999
- [27] Gwa, Schweiz. Verein des Gas- und Wasserfaches: Erdgas als Treibstoff für Nutzfahrzeuge, Zürich, September 1999 ???
- [28] Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL)  
[http://www.umwelt-schweiz.ch/buwal/de/fachgebiete/fg\\_luft-/themen/auswirkungen/index.html](http://www.umwelt-schweiz.ch/buwal/de/fachgebiete/fg_luft-/themen/auswirkungen/index.html)  
(Stand Juni 2002)
- [29] Verein für umweltgerechte Elektrizität (VUE)  
<http://www.naturemade.org/d/naturemade/index.htm>  
(Stand Mai 2002)
- [30] Zürcher Kantonalbank  
Saubere Luft im Kanton Zürich: Leitlinie für eine effiziente Luftreinhaltepolitik  
Institut für Empirische Wirtschaftsforschung der Universität Zürich;  
September 1993



## **Anhang**

- A1 Kurzbeschreibung Ökobilanzmethoden
- A2 Grundlagen Umweltauswirkungen
- A3 Grundlagen Wirtschaftlichkeitsrechnung
- A4 Alternativ-Varianten und Sensitivitätsanalysen
- A5 Alternativen der Gasbetankung

## A1 Kurzbeschreibung Ökobilanzmethoden

### Ökologische Knappheit 1998 (BUWAL SRU 297)

Das Bewertungsverfahren dieser Methode [4] geht davon aus, dass in einem geographisch begrenzten Raum (hier: Schweiz) festgelegt werden kann, welchen Massenfluss ein bestimmter Stoff erreichen darf, damit die erwünschte Umweltqualität dieses Raumes erhalten bleibt<sup>1)</sup>. Dieser Referenzfluss wird in Verhältnis zu dem tatsächlichen Stofffluss gesetzt. Die Umweltbelastung eines Stoffes ist umso grösser, je höher der tatsächliche Fluss über dem (gerade noch un-schädlichen) Referenzfluss liegt.

Bei der Methode der Ökologischen Knappheit werden die Referenzflüsse für ausgewählte Substanzen von gesetzlichen Normen oder anderen verbindlichen Verpflichtungen abgeleitet. Dieses Bewertungsverfahren erlaubt eine Addition der berechneten Massgrössen zu einer Kenngrösse für die Gesamt-Umweltbelastung (sogenannte Umweltbelastungspunkte UBP). Diese Methodik stellt in der Schweiz die am häufigsten angewandte Systematik dar. Der Ansatz wurde auch auf eine ganze Reihe anderer Staaten übertragen. Die Liste der Indikatoren wurde 1997 einer Überprüfung und Aktualisierung unterzogen, womit der Ansatz auch kurz- bis mittelfristig seine "Führungsposition" halten kann.

### CML-Methode<sup>2)</sup>

Das Bewertungsverfahren dieser Methode [6] geht von der Unterscheidung verschiedener Umweltprobleme (Wirkungskategorien) aus, z.B. "Ozonschichtzerstörung", "Treibhauseffekt" oder "Übersäuerung". Für jedes Umweltproblem wird – auf möglichst naturwissenschaftlichem Weg – ermittelt, in welchem Ausmass bestimmte Umwelteinwirkungen zu diesem Umweltproblem beitragen (Klassifikation).

Die CML-Methode gibt für eine ganze Reihe von Umwelteinwirkungen (ca. 560) an, welche Beiträge sie zu heutigen Umweltproblemen (Wirkungskategorien) leisten. Das Endergebnis der CML-Bewertung sind sogenannte "Effect Scores" pro Wirkungskategorie. Innerhalb einer bestimmten Wirkungskategorie können die Ergebnisse mittels Addition zusammengezogen werden (Teilaggregation).

Die CML-Methode ist relativ weit verbreitet und zeichnet sich durch eine hohe Vollständigkeit und wissenschaftliche Akzeptanz aus. Sie berücksichtigt verschiedene, in der Öffentlichkeit bedeutsame Umweltprobleme und erfasst u.a. auch die Toxizität von Substanzen. Die Datengrundlagen werden weiterentwickelt.

---

1) Beispiel: Höhe der Emissionen der gesamten Schweiz, damit die Immissionsgrenzwerte der Luftreinhalteverordnung eingehalten werden können.

2) Diese Methode wurde an der Universität Leiden entwickelt (Centrum voor Milieukunde, Leiden)

**Eco-indicator 99**

Diese schadenorientierte Methode [5] wurde für die Beurteilung der Umweltauswirkungen von Produkten in der Produkteentwicklung entwickelt. Ausgangspunkt ist der Zustand der Umwelt, der durch die drei Schadenkategorien Humangesundheit, Ökosystemqualität und Ressourcen-vorrat abgebildet wird. Durch wissenschaftlich fundierte Schadenmodelle werden in einem ersten Schritt ähnlich wie bei der CML-Methode die durch Emissionen, Landnutzung und Ressourcenabbau geleisteten Beiträge an verschiedene Umweltprobleme (Wirkungskategorien) quantifiziert. In einem zweiten Schritt werden mittels Schadensfunktionen die verursachten Umweltschäden berechnet. So können für Materialien oder Prozesse die einzelnen Umweltprobleme zu einer Kenngrösse (Eco-indicator points) zusammengezogen werden. Es sind standard Eco-Indikatoren für über 200 Materialien oder Prozessen verfügbar. Der Eco-Indicator 99 unterscheidet drei verschiedene kulturelle Perspektiven, die einen Einfluss auf die Beurteilung der Gefährdung haben. In dieser Studie interessieren die langfristigen Auswirkungen, weshalb die Version Egalitarian (E) gewählt wird.

Diese Methode bezieht sich auf Europa und findet in der Praxis grosses Interesse. Der Ansatz zeichnet sich durch ein eindeutiges Gesamtergebnis aus. Er stellt eine (wenn auch nicht vollständige) Kombination von UBP und CML dar, ist allerdings weniger nachvollziehbar und transparent als die beiden erstgenannten Ansätze.

**Parallele Anwendung der drei Ökobilanzmodelle**

Die parallele Anwendung der drei Methoden mit Hilfe der Ökobilanz-Software REGIS 2.2 erlaubt eine Relativierung der einzelnen Ansätze, ohne dass ein nennenswerter Mehraufwand anfällt. So können zum einen die Ergebnisse von CML und Eco-Indicator und andererseits die Ergebnisse der Ökologischen Knappheit direkt mit Eco-Indicator verglichen werden. Damit können die Resultate eines jeden Ansatzes als „Verstärker“, von eindeutigen oder eben nicht eindeutigen Ergebnissen dienen.

## A2 Grundlagen Umweltauswirkungen

### A2.1 Grundlagen und Annahmen

		Diesel	Biogas/Erdgas	Strom	Quellen
<b>Energie- / Treibstoffverbrauch</b>	kWh / Fzkm	3.94	4.93 (Diesel +25%)	<b>2.0</b>	Diesel-/Trolley:Auskunft WV Biogas: [12],[15]-[18]
	l / Fzkm	<b>0.4</b>			
	kg / Fzkm	0.334	<b>0.375</b>		
<b>Parameter</b>					
Heizwert H <sub>U</sub>	kWh / l	9.86			z.B. [12],[13],[21],[22]
Heizwert H <sub>U</sub>	kWh/ kg		13.16		
Dichte	kg/m³	835	0.78		
<b>Umrechnungsfaktor</b>				3.6 MJ / kWh	
<b>Weitere Umrechnungen für Gasbus</b>					
m3 Rohgas pro t Grüngut		100 m3 / 1 t			aus [13]
Dichte Rohgas		1.13 m3 / 1 t			
Heizwert HU Rohgas		6 kWh / kg			
Verhältnis Reingas / Rohgas		0.6 m3 Reingas / m3 Rohgas			

Tabelle 1: Annahmen und Grundlagen zu den Eingabedaten, vgl. auch Anhang A3

Aus Tabelle 1 resultieren folgende Verhältnisse:

- Diesel: 1 Fzkm = 0.4 l Diesel = 0.334 kg Diesel = 3.94 kWh
- Gasbus: 1 Fzkm = 0.375 kg Reingas = 0.48 m<sup>3</sup> Reingas = 0.80 m<sup>3</sup> Rohgas = 0.008 t Grüngut = 4.93 kWh
- Trolley: 1Fzkm = 2 kWh = 7.2 MJ

### Annahmen zu den Inventaren Gasbus

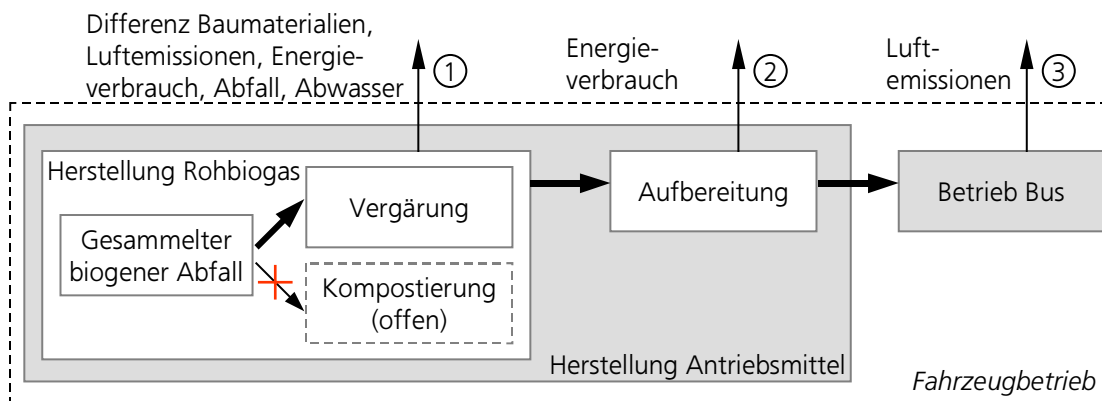


Abbildung 1: Systemgrenzen für die beiden Biogas-Varianten

Für die Bilanzierung des Prozesses „Herstellung Antriebsmittel“ im Falle Biogas wird von zwei Szenarien „Biogas 2002“ und „Biogas 2025“ ausgegangen, wobei nur Teilprozess ① ändert (vgl. Abbildung 1). Teilprozess ② und der Prozess „Betrieb Bus“ (③) bleiben gleich und werden deshalb unten nur einmal beschrieben.

### **Biogas 2002, Teilprozess ①**

- Dieses Szenarium beschreibt die heutige Situation: Die anfallenden organischen Abfälle (Grüngut, Küchenabfälle, ..) müssen entsorgt werden, die wichtigsten Wege sind KVA, Kompostierung und Vergärung. Die Vorteile der Vergärung wurden erkannt, es besteht aber noch ein grosses Potenzial für zusätzliche Anlagen. Je grösser die Nachfrage nach Produkten der Vergärung (Biogas mit Erdgasqualität, Ökostrom) ist, um so mehr Vergärungsanlagen werden gebaut. Die Verwertung verschiebt sich in diesem Fall von der Verbrennung in der KVA und von der offenen Kompostierung zur Vergärung.
- Im Rahmen dieser Studie können keine eigenen Daten erhoben werden, es muss deshalb ein pragmatischer Ansatz gewählt werden, der sich an vorhandenen Daten orientiert. Die oben formulierte These wird deshalb weiter eingeschränkt: Biogene Abfälle werden bereits separat gesammelt und es findet deshalb eine Verschiebung von der offenen Kompostierung zur Vergärung statt (keine Entlastung der KVA). Es kann nicht berücksichtigt werden, dass die Ansprüche der Vergärung und der Kompostierung an die Zusammensetzung der biogenen Abfälle verschieden sind.
- ➔ Die Differenz der Stoff- und Energieflüsse zwischen Kompostierung und Vergärung wird der Biogasherstellung belastet bzw. gutgeschrieben. Nährstoffgutschriften resultieren keine, weil sie bei beiden Verwertungsarten gleich gross sind.
- Als Datengrundlage steht eine Ökobilanz zur Verfügung, welche die Vergärung mit anschliessender Stromherstellung in einem BHKW sowie die offene Kompostierung bilanziert [13]. Da hier die Vergärung mit anschliessender Aufbereitung zu Erdgasqualität bilanziert wird, muss folgende Annahme getroffen werden: Bei dem in [13] bilanzierten Vergärungsprozess mit Stromherstellung im BHKW resultiert ein Stromüberschuss. Es wird angenommen, dass dieser Überschuss 2/3 der produzierten Menge entspreche, während 1/3 Eigenverbrauch der Anlage ist. Weiter wird angenommen, dass bei Vergärung ohne BHKW dieser Eigenverbrauch gleich gross ist und dass er aus Image-gründen mit Schweizer Wasserkraftstrom gedeckt werde.
- Der selben Ökobilanz werden auch die Zahlen bezüglich Luftemissionen entnommen. Weil in [13] ein BHKW, in welchem ein Verbrennungsprozess abläuft, mitbilanziert wird, werden die Luftemissionen tendenziell überschätzt. Die CO<sub>2</sub>-Emissionen werden auf Null gesetzt, weil für den Biogasbus CO<sub>2</sub>-Neutralität angenommen wird.

### **Biogas 2025, Teilprozess ①**

- Dieses Szenarium beschreibt eine zukünftige Situation, in der das Potenzial der Vergärung ausgeschöpft wird. Es besteht eine Konkurrenzsituation zwischen verschiedenen Produkten der Vergärung, aufbereitetes Biogas als Antriebsmittel ist eines davon. Ausgangspunkt dieser Produkte ist Rohgas (Rohbiogas nach der Vergärung), welches unabhängig von der spezifischen Produktnachfrage hergestellt werde und als Rohstoff zur Verfügung steht. Für dieses Szenario liegt deshalb Teilprozess ① ausserhalb der Systemgrenzen (entspricht Entstehung Erdgas und Rohöl), d.h. es werden keine Gutschriften für wegfallende Kompostierung gemacht.

**Teilprozess ②**

- Zum Aufbereitungsschritt liegen wenig Angaben vor. Laut [14] wurde bei einer Gasaufbereitungsanlage im Jahr 1997 ein Stromverbrauch von 8% im Vergleich zum Energiegehalt des Reingases festgestellt. Weil über die Stoffflüsse keine verlässlichen Angaben vorliegen, wird in dieser Studie stellvertretend für andere Belastungen mit einem Stromverbrauch von 10% im Vergleich zum Energiegehalt des Reingases gerechnet, wobei wiederum Schweizer Wasserkraftstrom eingesetzt wird. (0.494 kWh/Fzkm).

**Prozess „Betrieb Bus“ (③)**

- Der Betrieb des Busses beschreibt die direkten Emissionen beim Fahren. Für den Biogasbus wird CO<sub>2</sub>-Neutralität angenommen (die CO<sub>2</sub>-Emissionen werden auf Null gesetzt). Die eingesetzten Zahlen basieren auf der BUWAL-Studie „Ökopprofile von Treibstoffen“ [12] und werden durch diverse Quellen bestätigt (siehe unten „Inventar Verwendung – Gasbus (EBP)“).

Im Grundvergleich wird für die Variante „Biogas“ vom Szenario „Biogas 2025“ ausgegangen.

## A2.2 Verwendete Ökoinventare

Variante	Messstelle (REGIS 2.2)	Verwendete Ökoinventare
<b>Diesel</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Linienbus Winterthur</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Verwendung - Linienbus EURO3 (EBP) Annahme Emissionen durch EBP (siehe unten)</li> <li>Vorstufe - Diesel ab Regionallager CH Ökoinventare Transporte, Infras 1995</li> </ul>
<b>Trolley</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Strom Trolleybus Winterthur</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Vorstufe Strom ab Mittelspannung UCTPE Ökoinventar von Energiesystemen, ESU, 1996</li> </ul>
<b>Gasbus</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Gasbus Winterthur</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Verwendung – Gasbus (EBP) Annahme Emissionen durch EBP (siehe unten)</li> <li>Vorstufe – Biogas Aufbereitung Ergänzung Annahme Emissionen durch EBP (siehe unten)</li> <li>Aluminium (0% Recycling) Ökoinventar von Energiesystemen, ESU, 1996</li> <li>Beton (ohne Armierungseisen) Ökoinventar von Energiesystemen, ESU, 1996</li> <li>Gusseisen Ökoinventar von Energiesystemen, ESU, 1996</li> <li>Kupfer Ökoinventar von Energiesystemen, ESU, 1996</li> <li>Polystyrol schlagfest Ökoinventare und Wirkungsbilanzen von Baumaterialien, ETH, 1995</li> <li>PVC schlagfest Ökoinventare und Wirkungsbilanzen von Baumaterialien, ETH, 1995</li> <li>Sand für Bau Ökoinventar von Energiesystemen, ESU, 1996</li> <li>Armierungsstahl Ökoinventare und Wirkungsbilanzen von Baumaterialien, ETH, 1995</li> <li>Bitumen ab Raffinerie CH Ökoinventar von Energiesystemen, ESU, 1996</li> <li>Diesel ab Regionallager CH Ökoinventar von Energiesystemen, ESU, 1996</li> <li>Fremdstoffe, Abfall CH95 in KVA Ökoinventare von Entsorgungsprozessen, ESU, 1996</li> <li>Abwasser in CH-ARA Klasse 2 Ökoinventare von Entsorgungsprozessen, ESU, 1996</li> </ul>

Tabelle 2: Verwendete Inventare für den Grundvergleich

Ökoinventar	Einheit	Umrechnung auf 1 Fzkm	Annahmen (siehe unten)
1. Verwendung - Linienbus EURO3 (EBP)	Fzkm	1 Fzkm = 1 Fzkm	
2. Vorstufe - Diesel ab Regionallager CH	Kg	1 Fzkm = 0.334 kg Diesel	0.4 l/Fzkm und 0.835 kg/l
3. Vorstufe Strom ab Mittelspannung UCTPE	MJ	1 Fzkm = 7.2 MJ	2 kWh/Fzkm und 3.6 MJ/kWh
4. Verwendung – Gasbus (EBP)	Fzkm	1 Fzkm = 1 Fzkm	
5. Vorstufe – Biogas ab Aufbereitung (regional)	kg	1 Fzkm = 0.375 kg	
6. Vorstufe – Aluminium (0% Recycling)	kg	vgl. Tabelle 4, „pro Fzkm“	
7. Vorstufe – Beton (ohne Armierungseisen)	kg	vgl. Tabelle 4, „pro Fzkm“	
8. Vorstufe – Gusseisen	kg	vgl. Tabelle 4, „pro Fzkm“	
9. Vorstufe – Kupfer	kg	vgl. Tabelle 4, „pro Fzkm“	
10. Holzbaustoff Brettschichtholz	kg	vgl. Tabelle 4, „pro Fzkm“	
11. Vorstufe – Polystyrol schlagfest	kg	vgl. Tabelle 4, „pro Fzkm“	
12. Vorstufe – PVC schlagfest	kg	vgl. Tabelle 4, „pro Fzkm“	
13. Vorstufe – Sand für Bau	kg	vgl. Tabelle 4, „pro Fzkm“	
14. Stahl niedrig legiert	kg	vgl. Tabelle 4, „pro Fzkm“	
15. Vorstufe – Armierungsstahl	kg	vgl. Tabelle 4, „pro Fzkm“	
16. Vorstufe – Bitumen ab Raffinerie CH	kg	vgl. Tabelle 4, „pro Fzkm“	
17. Vorstufe – Diesel ab Regionallager CH	kg	vgl. Tabelle 4, „pro Fzkm“	
18. Fremdstoffe, Abfall CH95 in KVA	kg	vgl. Tabelle 4, „pro Fzkm“	
19. Abwasser in CH-ARA Klasse 2	m3	vgl. Tabelle 4, „pro Fzkm“	

*Tabelle 3: Eingabedaten und Umrechnungsfaktoren (Annahmen vgl. Anhang A3)*



## Inventar Verwendung – Linienbus EURO3 (EBP)

### **Annahmen zur Berechnung der Emissionen:**

Für die Parameter **Methan, Lachgas, Kohlendioxid und –monoxid, NMVOC, SO<sub>x</sub> und NO<sub>x</sub>** werden die Emissionsraten für den Betrieb eines Linienbusses dem Handbuch Emissionsfaktoren des BUWAL [10] entnommen. Dazu werden folgende Annahmen getroffen:

- Emissionen im warmen Betriebszustand
- Fahrzeugkategorie: Linienbus
- Jahr: 2004
- Verkehrszusammensetzung: 28t/Euro3,4,5/GV
- Konzept: SMW/EURO 3
- Verkehrssituation: IO\_HVS2
- Längsneigung: 0%

Die Partikelemissionen werden durch den CRT-Filter auf das Niveau von EURO4 reduziert (gemäss VBZ [20] und Auskunft von EvoBus Schweiz AG [25]). Deshalb wird für den Parameter **Partikel** der EURO4-Wert gemäss BUWAL [10] eingesetzt.

Für die Parameter **Cadmium** und **Zink** werden die Emissionsraten aus dem Ökoinventar Transporte [9] für Regionalbus CH, EURO3 übernommen. Es wird angenommen, dass kein **Blei** emittiert wird.

### **INVENTAR**

*Emissionen [g/Fzkm]:*

- |                   |        |
|-------------------|--------|
| • Methan          | 0.0167 |
| • Lachgas         | 0.033  |
| • Kohlendioxid    | 979    |
| • Kohlenmonoxid   | 1.135  |
| • NMVOC           | 0.683  |
| • SO <sub>x</sub> | 0.0628 |
| • NOX             | 6.2855 |
| • Partikel        | 0.04   |
| • Cadmium         | 7.8e-6 |
| • Blei            | 0      |
| • Zink            | 0.0208 |

### Inventar Vorstufe – Biogas Aufbereitung Ergänzung

Diesem Inventar liegen die in Kapitel A2.1 unter „Biogas 2002, Prozess ①“ beschriebenen Annahmen zugrunde. Die Quantifizierung der Stoffflüsse basiert hauptsächlich auf den Daten der BfE-Studie „Ökologischer, ökonomischer und energetischer Vergleich von Vergärung Kompostierung und Verbrennung fester biogener Abfallstoffe“ [13].

#### INVENTAR

Inventar / Stoff		VN pro 10'000t Grüngut+Jahr	KO	Differenz	Differenz pro kg Gas	Differenz pro Fzkm
<b>Baumaterialien/Diesel</b>						
Fläche III-IV	m2	250	750	-500	<b>-1.07E-03</b>	
Aluminium (0% Recycling)	kg	50	0	50		4.00E-05
Beton (ohne Armierungseisen)	kg	204000	32280	171720		1.37E-01
Kies	kg	98620	865100	-766480	<b>-1.64E+00</b>	
Gusseisen	kg	9400	2000	7400		5.92E-03
Kupfer	kg	150	5000	-4850		-3.88E-03
Holzbaustoff Brettschichtholz	kg	0	15	-15		-1.20E-05
Polystyrol schlagfest	kg	196	0	196		1.57E-04
PVC schlagfest	kg	175	0	175		1.40E-04
Sand für Bau	kg	5320	46650	-41330		-3.31E-02
Stahl niedrig legiert	kg	0	1500	-1500		-1.20E-03
Armierungsstahl	kg	6000	850	5150		4.12E-03
Bitumen ab Raffinerie CH	kg	558	4.895	553.105		4.42E-04
Diesel ab Regionallager CH	kg	1700	14450	-12750		-1.02E-02
Strom Wasserkraft CH	MJ	1800000	230000	1570000		1.26E+00
<b>Emissionen</b>						
CH4 Methan	kg	110700	54800	55900	<b>1.19E-01</b>	
CO Kohlenmonoxid	kg	591	692	-101	<b>-2.16E-04</b>	
CO2 Kohlendioxid *)	kg				<b>0</b>	
NOX Stickoxide als NO2	kg	418	2448	-2030	<b>-4.34E-03</b>	
NH3 Ammoniak	kg	264	5280	-5016	<b>-1.07E-02</b>	
N2O Lachgas	kg	1516	1516	0	<b>0</b>	
H2S Schwefelwasserstoff	kg	2852	2852	0	<b>0</b>	
<b>Abfall</b>						
Fremdstoffe, Abfall CH95 in KVA	kg	100000	100000	0		0
<b>Abwasser</b>						
Abwasser in CH-ARA Klasse 2	m3	450	4500	-4050		-3.24E-03
Umrechnung: 1 Fzkm = 0.008 t Grüngut -->						
					10'000t Grüngut / 1 Fzkm =	8.00E-07
					10'000t Grüngut / 1 kg Reingas =	2.14E-06

\*) Annahme: Biogas ist CO2-neutral

Tabelle 4: Inventar Vorstufe - Biogas Aufbereitung Ergänzung (nur grau markierte Felder)

## Inventar Verwendung – Gasbus (EBP)

### **Annahmen zur Berechnung der Emissionen:**

Das Inventar basiert auf der BUWAL-Studie „Ökopprofile von Treibstoffen“ (1) und wird durch diverse Quellen bestätigt. In [12] sind die Emissionen in g/kWh angegeben; für die Umrechnung auf g/Fzkm werden die oben hergeleiteten 4.93 kWh/Fzkm und ein Wirkungsfaktor  $\eta = 0.3$  angenommen [18],[24].

### **INVENTAR** basierend auf (1)

Emissionen:	[g/kWh]	[g/Fzkm]
• Methan	0.16	0.24
• Lachgas <b>1)</b>	0	0
• Kohlendioxid <b>4)</b>	0	0
• Kohlenmonoxid	0.5	0.74
• NMVOC	0.02	0.03
• SOX <b>2)</b>	0	0
• NOX	1	1.48
• Partikel <b>3)</b>	0.02	0.03
• Cadmium <b>1)</b>	0	0
• Blei <b>1)</b>	0	0
• Zink <b>1)</b>	0	0

1) Keine Daten verfügbar --> Annahme der Autoren.

2) Schwefelgehalt des Biogases ist verschwindend klein, z.B. [14],[16]

3) (1) korrigiert gemäss [17],[24],[25]

4) für Erdgas-Bus: 700 g/kWh bzw. 1035 g/Fzkm; wird hier nicht berücksichtigt, weil Biogas als CO<sub>2</sub>-neutral gilt.

### A2.3 Resultate –Sachbilanz

#### Sachbilanz Grundvariante

CO <sub>2</sub> -Emissionen	g	%
Trolley	1010	89%
Diesel	1140	100%
Biogas	1.69	0%

NO <sub>x</sub> -Emissionen	g	%
Trolley	1.73	24%
Diesel	7.16	100%
Biogas	1.49	21%

SO <sub>2</sub> -Emissionen	g	%
Trolley	6.09	100%
Diesel	0.804	13%
Biogas	4.05E-03	0%

Partikel-Emissionen	g	%
Trolley	0.254163	100%
Diesel	0.11628	46%
Biogas	0.0304544	12%

Primärenergie	MJ	%	MJ	%
		<i>erneuerbar</i>	<i>nicht erneuerbar</i>	
Trolley	1.5497	7%	21.264	93%
Diesel	0.07597	0%	16.9686	74%
Biogas	2.29022711	10%	0.019171	0%

Tabelle 5: Zahlen Sachbilanz, Grundvariante

**Lokale/globale Emissionen**

	<b>gesamt</b>	<b>lokal</b>	<b>global</b>	<b>lokal</b>	<b>global</b>
<b>CO<sub>2</sub>-Emissionen</b>	<b>g</b>	<b>g</b>	<b>g</b>	<b>%</b>	<b>%</b>
Trolley	1010	0	1010	0%	89%
Diesel	1140	979	161	86%	14%
<b>NO<sub>x</sub>-Emissionen</b>	<b>g</b>	<b>g</b>	<b>g</b>	<b>%</b>	<b>%</b>
Trolley	1.73	0	1.73	0%	24%
Diesel	7.16	6.29	0.871	88%	12%
<b>SO<sub>2</sub>-Emissionen</b>	<b>g</b>	<b>g</b>	<b>g</b>	<b>%</b>	<b>%</b>
Trolley	6.09	0	6.09	0%	100%
Diesel	0.804	0.0628	0.741	1%	12%
<b>Partikel-Emissionen</b>	<b>g</b>	<b>g</b>	<b>g</b>	<b>%</b>	<b>%</b>
Trolley	0.254163	0	0.254	0%	100%
Diesel	0.11628	0.04	0.07628	16%	30%

Tabelle 6: Sachbilanz unterteilt nach lokalen und globalen Emissionen

## A2.4 Resultate –Wirkungsbilanz

Ökologische Knappheit 97 in UBP	Total	Abfälle	Emissionen Boden	Emissionen Wasser	Ressourcen	Emissionen Luft
Trolley	1280	511	7.81E-02	26.7	23	719
Diesel	1200	260	12.2	19.6	17.1	893
Gasbus	113	5.32	1.53E-04	6.07E-02	2.31	105

Ökologische Knappheit 97	UBP	%
Trolley	1280	100 %
Diesel	1200	94 %
Gasbus	113	9 %

Luftemissionen in kUBP	Trolley	Diesel	Gasbus	Trolley	Diesel	Gasbus
CO <sub>2</sub>	0.201	0.228	0.000338	23%	26%	0%
NO <sub>x</sub>	0.116	0.479	0.0995	13%	54%	11%
SO <sub>2</sub>	0.323	0.0426	0.000215	36%	5%	0%
NMVOG	0.0153	0.11	0.00101	2%	12%	0%
übrige Stoffe	0.0637	0.0334	0.003937	7%	4%	0%

Abfälle in kUBP	Trolley	Diesel	Gasbus	Trolley	Diesel	Gasbus
hochradioaktiv	0.173	0.00435	6.73E-05	34%	1%	0%
schwach-mittelradioaktiv	0.152	0.0039	6.10E-05	30%	1%	0%
schwachradioaktiv	0.116	0.242	0.00011	23%	47%	0%
übrige Abfälle	0.07	0.00975	5.08E-03	14%	2%	1%

Eco-Indicator 99	mPt	%
Trolley	0.0497	65%
Diesel	0.0769	100%
Gasbus	0.00391	5%

Eco-Indicator 99	Trolley	Diesel	Gasbus	Trolley	Diesel	Gasbus
Karzinogene	0.0014	0.000169	8.79E-06	2%	0%	0%
Klimaänderung	0.00432	0.0048	3.24E-05	6%	6%	0%
Ozonschichtabbau	9.01E-06	3.48E-05	1.29E-08	0%	0%	0%
Beeinträchtigung der Atmungswege (anorg.)	0.0139	0.0148	0.00299	18%	19%	4%
Beeinträchtigung der Atmungswege (org.)	1.71E-05	0.000109	1.15E-05	0%	0%	0%
Übersäuerung / Überdüngung	0.00158	0.00407	0.000828	2%	5%	1%
Ökotoxische Emissionen	0.000346	0.00643	3.48E-06	0%	8%	0%
Primärenergiegewinnung	0.0282	0.0464	3.90E-05	37%	60%	0%

CML 1992 - absolut	Einheit	Trolley	Diesel	Gasbus
Geruchsbelastung (1/OVT)	m <sup>3</sup> Luft	2338	356	39.8
Ökotoxizität aquatisch (ECA)	m <sup>3</sup> Wasser	22.6	35.9	0.0798
Ökotoxizität terrestrisch (ECT)	kg Boden	0.185	55.2	0.000334
Ozonschichtabbau (ODP)	kg CFC11-eq	5.23E-07	2.28E-06	8.16E-10
Sommersmog (POCP)	kg Ethylen-eq	2.64E-05	6.50E-05	1.74E-06
Treibhauseffekt (GWP)	kg CO <sub>2</sub> -eq	1.04	1.17	0.00438
Überdüngung (NP)	kg PO <sub>4</sub> -eq	0.000306	0.000956	0.000193
Übersäuerung (AP)	kg SO <sub>2</sub> -eq	0.00748	0.00582	0.00104
Humantoxizität Boden (HCS)	kg HC	9.62E-10	2.06E-07	2.28E-12
Humantoxizität Luft (HCA)	kg HC	0.00874	0.00662	0.00117
Humantoxizität Wasser (HCW)	kg HC	8.35E-06	2.04E-06	1.51E-08

CML 1992 - prozentual	Einheit	Trolley	Diesel	Gasbus
Geruchsbelastung (1/OVT)	%	100%	15%	2%
Ökotoxizität aquatisch (ECA)	%	63%	100%	0%
Ökotoxizität terrestrisch (ECT)	%	0%	100%	0%
Ozonschichtabbau (ODP)	%	23%	100%	0%
Sommersmog (POCP)	%	41%	100%	3%
Treibhauseffekt (GWP)	%	89%	100%	0%
Überdüngung (NP)	%	32%	100%	20%
Übersäuerung (AP)	%	100%	78%	14%
Humantoxizität Boden (HCS)	%	0%	100%	0%
Humantoxizität Luft (HCA)	%	100%	76%	13%
Humantoxizität Wasser (HCW)	%	100%	24%	0%

Tabelle 7: Zahlen Wirkungsbilanz, Grundvariante

## A3 Grundlagen Wirtschaftlichkeitsrechnung

### Kostenberechnung für die Variante Diesel

	Pro Jahr (beide Busse)	Pro km
Betrachtungszeitraum in Jahren	12	
Anzahl der von beiden Bussen der Linie 4 pro Jahr gefahrenen km	165'000	
<b>Betriebskosten</b>		
<i>Fixe Betriebskosten (unabhängig von Anzahl gefahrener Kilometer)</i>		
Gebäudeunterhalt / Infrastruktur Werkstatt / Depot	15'000	0.09
Kapitalkosten Werkstatt, Garage	25'000	0.15
Personalkosten Technik (Leitung und Projekte)	27'000	0.16
Total fixe Betriebskosten	67'000	0.41
<i>Variable Betriebskosten (abhängig von Anzahl gefahrener Kilometer)</i>		
Treibstoffkosten (Diesel)	49'500	0.30 <sup>(1)</sup>
Treibstoffkosten (Diesel) mit CO <sub>2</sub> -Steuer von 20 Rp pro Liter	62'700	0.38
Versicherungen und Gebühren	11'550	0.07
Schmierstoffe	1'650	0.01
Bereifungskosten	5'000	0.04
Reinigungs-/ Verbrauchsmaterial	8'250	0.05
Ersatzteile / Fremdleistungen	33'000	0.20
Variable Personalkosten Technik pro km (Werkstatt und Reinigung)	57'750	0.35
Personalaufwand des Betankungsprozesses	4'000	0.02
Total variable Betriebskosten	233'400	1.04
<b>Total Betriebskosten</b>	<b>237'700</b>	<b>1.45</b>
<b>Personalkosten Fahrer der Linie 4 pro Jahr (inkl. Lohnnebenkosten)</b>	<b>900'000</b>	<b>5.45</b> <sup>(2)</sup>
<b>Investitionskosten (beide Busse)</b>		
Desinvestitionskosten für den Abbruch der bestehenden Fahrleitung	200'000	
Investitionskosten für die Busbeschaffung	660'000	
Total investitionskosten	860'000	
Restwert der Busse in 12 Jahren	94'286 <sup>(3)</sup>	
Durchschnittlicher Zinssatz für das Investitionskapital in %	5	
Annuität	91'106	
<b>Total Investitionskosten</b>	<b>91'106</b>	<b>0.55</b>
<b>Totalkosten der Variante</b>	<b>1'228'806</b>	<b>7.45</b>

<sup>(1)</sup> Treibstoffkosten für Dieselbus: 0.75 CHF\*0.4 Liter Green- / Umweltdiesel pro km.

<sup>(2)</sup> Im Stadtverkehr benötigt der Bus ca. 20 min für eine Runde inklusive Wartezeiten. Es werden jährlich 35'000 Fahrten durchgeführt. Pro Tag muss mit ca. 4 h Reservezeit (Mittagessen, Weg zum Depot etc.) gerechnet werden. Total ergibt das einen Stundenaufwand von ca 13'000h pro Jahr. Der Stundensatz beträgt knapp 70 Franken.

<sup>(3)</sup> Dieselbusse werden im ZVV über 14 Jahre abgeschrieben.

### Kostenberechnung für die Variante Trolley

		Pro Jahr (beide Busse)	Pro km
Betrachtungszeitraum in Jahren	12		
Anzahl der von beiden Bussen der Linie 4 pro Jahr gefahrenen km	165'000		
<b>Betriebskosten</b>			
<i>Fixe Betriebskosten (unabhängig von Anzahl gefahrener Kilometer)</i>			
Gebäudeunterhalt / Infrastruktur Werkstatt / Depot		20'000	0.12
Kapitalkosten Werkstatt, Garage		30'000	0.18
Personalkosten Technik (Leitung und Projekte)		40'000	0.24
Unterhaltskosten Fahrleitung (Erneuerung alle 7.5 Jahre)		<u>65'000</u>	<u>0.39</u> <sup>(1)</sup>
Total fixe Betriebskosten		155'000	0.94
<i>Variable Betriebskosten (abhängig von Anzahl gefahrener Kilometer)</i>			
Fahrstromkosten konventioneller Strom		49'500	0.30 <sup>(2)</sup>
Alternative: Fahrstromkosten Wasserkraftstrom		56'100	0.34 <sup>(3)</sup>
Versicherungen und Gebühren		6'600	0.04 <sup>(4)</sup>
Bereifungskosten		6'500	0.04
Reinigungs-/ Verbrauchsmaterial		1'650	0.01
Ersatzteile / Fremdleistungen		23'100	0.14
Variable Personalkosten Technik (Werkstatt und Reinigung)		<u>85'800</u>	<u>0.52</u> <sup>(5)</sup>
Total variable Betriebskosten		229'250	1.05
<b>Total Betriebskosten</b>		<b>328'150</b>	<b>1.99</b>
<b>Personalkosten Fahrer der Linie 4 pro Jahr (inkl. Lohnnebenkosten)</b>		<b>900'000</b>	<b>5.45</b>
<b>Investitionskosten für die Linie 4 (beide Busse und Infrastruktur)</b>			
<i>Busbeschaffung</i>			
Investitionskosten total für die Busbeschaffung	2'000'000 <sup>(6)</sup>		
Investitionen zur Beibehaltung der Flexibilität bei der Trolleyvariante (Kauf von Ersatzdieselsbussen)	0 <sup>(7)</sup>		
Restwert der Busse in 12 Jahren	666'667 <sup>(8)</sup>		
<i>Fahrleitungsbeschaffung</i>			
Investitionskosten total für die Fahrleitungsbeschaffung/ Restauration	1'500'000		
%-Anteil des Nutzens anderer Trolleybuslinien an neuer Fahrleitung	10 <sup>(9)</sup>		
Investitionskosten der Fahrleitung, welche die Linie 4 zu tragen hat	1'350'000		
Restwert der Fahrleitung in 12 Jahren	702'000 <sup>(10)</sup>		
Summe Investitionskosten	3'350'000		
Summe Restwerte	1'368'667		
Durchschnittlicher Zinssatz für das Investitionskapital in %	5 <sup>(11)</sup>		
Annuität	291'978		
<b>Total Investitionskosten</b>		<b>291'978</b>	<b>1.77</b>
<b>Totalkosten der Variante</b>		<b>1'520'128</b>	<b>9.21</b>

<sup>(1)</sup> Kosten für die Erneuerung pro km CHF 40'000.- CHF (=25'000.- p.a. für die ganze Strecke). Die jährlichen Unterhaltskosten: CHF 40'000.- p.a.

<sup>(2)</sup> Strom liefern die Städtischen Werke Winterthur. Die Kosten belaufen sich auf 15 Rp pro kWh, verbraucht werden 2 kWh per km.

<sup>(3)</sup> Strom aus 100% Wasserkraft ist 2 Rp teurer als konventioneller Strom. Ein solches Stromprodukt steht in Winterthur kurz vor der Einführung.

<sup>(4)</sup> Haftpflichtversicherung ist für Trolleybusse aufgrund des niedrigeren Unfallrisikos ca 50% günstiger als beim Dieselsbus.

<sup>(5)</sup> Erhöhte Ausbildungskosten und Aufwand für Elektronik.

<sup>(6)</sup> 2-achsige Trolleybusse sind Einzelanfertigungen und damit vergleichsweise teurer

<sup>(7)</sup> Es gibt kein Aufwand zur Sicherstellung der geringeren Flexibilität der Trolleybusse, da die Flotte der Verkehrsbetriebe gross genug ist.

<sup>(8)</sup> Trolleybusse werden im ZVV grundsätzlich über 20 Jahre abgeschrieben, aufgrund der Erfahrungen der Verkehrsbetriebe wird dieser Wert hier jedoch auf 18 Jahre reduziert (Zustand der Chassis).

<sup>(9)</sup> Andere Linien profitieren von der erneuerten Fahrleitung der Linie 4. Das führt zu Synergieeffekten von 10% der Investitionen

<sup>(10)</sup> Fahrleitungen werden im ZVV über 25 Jahre abgeschrieben.

<sup>(11)</sup> Die Winterthurer Verkehrsbetriebe planen derzeit mit einem Kapitalkostensatz von 5%.



### Kostenberechnung für die Variante Biogas

		Pro Jahr (beide Busse)	Pro km
Betrachtungszeitraum in Jahren	12		
Anzahl der von beiden Bussen der Linie 4 pro Jahr gefahrenen km	165'000		
<b>Betriebskosten</b>			
<i>Fixe Betriebskosten (unabhängig von Anzahl gefahrener Kilometer)</i>			
Gebäudeunterhalt / Infrastruktur Werkstatt / Depot		15'000	0.09
Kapitalkosten Werkstatt, Garage.		25'000	0.15
Personalkosten Technik (Leitung und Projekte)		32'400	0.20 <sup>(1)</sup>
Sicherheitsüberprüfung Gasflaschen		<u>1'400</u>	<u>0.01</u> <sup>(2)</sup>
Total fixe Betriebskosten		73'800	0.45
<i>Variable Betriebskosten (abhängig von Anzahl gefahrener Kilometer)</i>			
Treibstoffkosten (Langsambetankungsanlage für 2 Busse im eigenen Depot)		74'250	0.45 <sup>(3)</sup>
Versicherungen und Gebühren		11'550	0.07
Schmierstoffe		1'650	0.01
Bereifungskosten		5'000	0.04
Reinigungs-/ Verbrauchsmaterial		8'250	0.05
Ersatzteile / Fremdleistungen		33'000	0.20
Variable Personalkosten Technik pro km (Werkstatt und Reinigung)		69'300	0.42 <sup>(1)</sup>
Personalaufwand des Betankungsprozesses		<u>4'000</u>	<u>0.02</u> <sup>(4)</sup>
Total variable Betriebskosten		207'000	1.25
<b>Total Betriebskosten</b>		<b>280'800</b>	<b>1.70</b>
<b>Personalkosten Fahrer der Linie 4 pro Jahr (inkl. Lohnnebenkosten)</b>		<b>900'000</b>	<b>5.45</b>
<b>Investitionskosten (beide Busse)</b>			
Desinvestitionskosten für den Abbruch der bestehenden Fahrleitung	200'000		
Investitionskosten für die Busbeschaffung	726'000 <sup>(5)</sup>		
Investitionskosten in die Betankungsanlage	0 <sup>(6)</sup>		
Total Investitionskosten	926'000		
Restwert der Busse in 12 Jahren	103'714 <sup>(7)</sup>		
Durchschnittlicher Zinssatz für das Investitionskapital in %	5		
Annuität	97'960		
<b>Total Investitionskosten</b>		<b>97'960</b>	<b>0.59</b>
<b>Totalkosten der Variante</b>		<b>1'278'760</b>	<b>7.75</b>

<sup>(1)</sup> Wartungs und Unterhaltskosten sind 20% höher als beim Dieselbus aufgrund der Umschulungen des Personals und eines etwas erhöhten Aufwandes für die neue Magermotortechnologie.

<sup>(2)</sup> Drucktest der Gastanks auf dem Bus alle 5 Jahre CHF 3500 pro Bus -> insgesamt 1400.-/ p.a.

<sup>(3)</sup> Verbrauch eines modernen Magermotors: 0.375 kg (4.93 kWh) Gas pro km (25% energetischen Mehrverbrauch gegenüber dem Dieselfahrzeug). Preis pro kg Gas: CHF 1.20 (Siehe Anhang: alternative Betankungsanlagen).

<sup>(4)</sup> Der Betankungsvorgang bei einer Gastankstelle weicht unwesentlich von dem der Dieseltankstelle ab (siehe Anhang A5)

<sup>(5)</sup> Gasfahrzeuge sind 10% teurer als vergleichbare Dieselfahrzeuge

<sup>(6)</sup> Investitionskosten für die verschiedenen Betankungsvarianten sind im Treibstoffpreis eingerechnet (siehe Anhang A5).

<sup>(7)</sup> Gasbusse werden wie Dieselbusse über 14 Jahre abgeschrieben

## A4 Alternativ-Varianten und Sensitivitätsanalysen

### A4.1 Alternativ-Varianten - Umwelt

Variante	Messstelle (REGIS 2.2)	Verwendete Ökoinventare
<b>Erdgas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Gasbus Erdgas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Verwendung – Gasbus (EBP) Annahme Emissionen durch EBP (siehe oben)</li> <li>Vorstufe – Erdgas HG – Abnehmer CH Ökoinventar von Energiesystemen, ESU, 1996</li> </ul>
<b>Biogas 2002</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Gasbus 2002</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Verwendung – Gasbus (EBP) Annahme Emissionen durch EBP (siehe oben)</li> <li>Vorstufe – Biogas Aufbereitung Annahme Emissionen durch EBP (siehe oben)</li> </ul>
<b>Trolley -</b>	siehe Darstellung der Berechnung	
<b>Wasserkraft</b>	in Tabelle 9	

Tabelle 8: Messstellen und Inventare der Alternativ-Varianten Erdgas und Biogas-Dichte

Rechenschritt	Inventar
Emissionen, UBP und Ept gemäss <b>Grundvergleich</b> :	<ul style="list-style-type: none"> <li>Vorstufe Strom ab Mittelspannung UCPT E Ökoinventar für Energiesysteme, ESU, 1996 (Stromherstellung inkl. Verteilung)</li> </ul>
-	
Emissionen, UBP und Ept aus <b>Stromherstellung UCPT E</b> :	<ul style="list-style-type: none"> <li>Strom Mix UCPT E Ökoinventar für Energiesysteme, ESU, 1996 (nur Stromherstellung)</li> </ul>
+	
Emissionen, UBP und Ept aus <b>Stromherstellung Wasserkraft CH</b> :	<ul style="list-style-type: none"> <li>Strom ab Wasserkraft CH Ökoinventar für Energiesysteme, ESU, 1996 (nur Stromherstellung)</li> </ul>
=	
Emissionen, UBP und Ept für <b>Sensitivität Wasserkraft</b>	

Tabelle 9: Berechnungsgrundlagen für Alternativ-Variante Wasserkraft

**Alternativ-Variante Wasserkraft**

<b>Trolley-Wasserkraft</b>	Grundversion	- UCPTE	+ Wasserkraft	g
CO <sub>2</sub> -Emissionen	1010	987	6.83	29.83
NO <sub>x</sub> -Emissionen	1.73	1.69	0.0214	0.0614
SO <sub>2</sub> -Emissionen	6.09	5.94	0.0164	0.1664
Partikel-Emissionen	0.2542	0.2459	0.0018	0.0101

Tabelle 10: Berechnung Sachbilanz, Alternativ-Variante Wasserkraft

**Sachbilanz Alternativ-Varianten**

<b>CO<sub>2</sub>-Emissionen</b>	<b>g</b>	<b>%</b>
Trolley	1010	89%
Trolley - Wasserkraft	29.8	3%
Diesel	1140	100%
Biogas	1.69	0%
Biogas 2002	20.3	2%
Erdgas	1160	102%

<b>NO<sub>x</sub>-Emissionen</b>	<b>g</b>	<b>%</b>
Trolley	1.73	24%
Trolley - Wasserkraft	0.1	1%
Diesel	7.16	100%
Biogas	1.49	21%
Biogas 2002	-0.104	-1%
Erdgas	1.95	27%

<b>SO<sub>2</sub>-Emissionen</b>	<b>g</b>	<b>%</b>
Trolley	6.09	100%
Trolley - Wasserkraft	0.2	3%
Diesel	0.804	13%
Biogas	0.00405	0%
Biogas 2002	-0.353	-6%
Erdgas	0.442	7%

<b>Partikel-Emissionen</b>	<b>g</b>	<b>%</b>
Trolley	0.254163	100%
Trolley - Wasserkraft	0.0101	4%
Diesel	0.11628	46%
Biogas	0.0304544	12%
Biogas 2002	0.035073	14%
Erdgas	0.04187	16%

Tabelle 11: Resultate Sachbilanz , Alternativ-Varianten

**Alternativ-Variante Wasserkraft**

<b>Trolley-Wasserkraft</b>	Grundversion	- UCPT	+ Wasserkraft	UBP
Ökologische Knappheit 97	1280	1250	35.5	65.5
Eco-Indicator 99	0.0497	0.0484	0.0003	0.0016

Tabelle 12: Berechnung Wirkungsbilanz, Alternativ-Variante Wasserkraft

**Wirkungsbilanz Alternativ-Varianten**

<b>Ökologische Knappheit 97</b>	UBP	%
Trolley	1280	100%
Trolley-Wasserkraft	65.5	5%
Diesel	1200	94%
Biogas	113	9%
Biogas 2002	-83.5	-7%
Erdgas	472	37%

<b>Eco-Indicator 99</b>	mPt	%
Trolley	0.0497	65%
Trolley-Wasserkraft	0.00164	2%
Diesel	0.0769	100%
Biogas	0.00391	5%
Biogas 2002	-0.00974	-13%
Erdgas	0.0707	92%

Tabelle 13: Resultate Wirkungsbilanz, Alternativ-Varianten

<b>Energieträger</b>	<b>Strom Mix CH</b>	<b>Strom Mix CH Import</b>	<b>Strom Mix UCPT</b>	<b>Strom Wasserkraft CH</b>
Steinkohle	0%	4.6%	17.5%	0%
Braunkohle	0%	2.3%	10.5%	0%
Erdöl	1.0%	2.3%	9.7%	0%
Erdgas	0%	1.3%	7.9%	0%
weitere Gase	0%	0.7%	1.9%	0%
Wasserkraft	58.7%	39.0%	14.2%	100%
Umwälzkraft	0.9%	0.9%	1.0%	0%
Nuklear-thermisch	38.3%	44.7%	36.9%	0%
andere	1.1%	0.8%	0.4%	0%

Tabelle 14: Anteile primärer Energieträger an verschiedenen Strom Mixen [10]

## A4.2 Alternativ-Varianten und Sensitivitäten – Wirtschaftlichkeit

### Grundvariante

Kostenarten	Diesel	Trolley	Biogas
Fixe Betriebskosten (unabhängig von Anzahl gefahrener Kilometer)	0.41	0.94	0.45
Variable Betriebskosten (abhängig von Anzahl gefahrener Kilometer)	<u>1.04</u>	<u>1.05</u>	<u>1.25</u>
Totale Betriebskosten	1.45	1.99	1.70
Personalkosten Fahrer der Linie 4 pro Jahr (inkl. Lohnnebenkosten)	5.45	5.45	5.45
Total Kapitalkosten	0.55	1.77	0.59
<b>Totalkosten der Variante pro Kilometer</b>	<b><u>7.45</u></b>	<b><u>9.21</u></b>	<b><u>7.75</u></b>
Unterschied in Franken pro Kilometer	basis	1.76	0.30
Unterschied in Franken pro Jahr (beide Busse fahren zusammen 165'000 km/Jahr)	basis	290'069	49'169
Unterschied prozentual	basis	24%	4%

### Alternativ-Variante Strom aus Wasserkraft

Kostenarten	Diesel	Trolley	Biogas
Fixe Betriebskosten (unabhängig von Anzahl gefahrener Kilometer)	0.41	0.94	0.45
Variable Betriebskosten (abhängig von Anzahl gefahrener Kilometer)	<u>1.04</u>	<u>1.09</u> +4	<u>1.25</u>
Totale Betriebskosten	1.45	2.03	1.70
Personalkosten Fahrer der Linie 4 pro Jahr (inkl. Lohnnebenkosten)	5.45	5.45	5.45
Total Kapitalkosten	0.55	1.77	0.59
<b>Totalkosten der Variante pro Kilometer</b>	<b><u>7.45</u></b>	<b><u>9.25</u></b>	<b><u>7.75</u></b>
Mehrkosten pro Kilometer im Vergleich zu Diesel:		1.80	0.30
Mehrkosten Prozentual im Vergleich zu Diesel:		24%	4%

### Alternativ-Variante Erdgas als Antriebsmittel

Kostenarten	Diesel	Trolley	Erdgas
Fixe Betriebskosten (unabhängig von Anzahl gefahrener Kilometer)	0.41	0.94	0.45
Variable Betriebskosten (abhängig von Anzahl gefahrener Kilometer)	<u>1.04</u>	<u>1.05</u>	<u>1.32</u> +7
Totale Betriebskosten	1.45	1.99	1.77
Personalkosten Fahrer der Linie 4 pro Jahr (inkl. Lohnnebenkosten)	5.54	5.45	5.45
Total Kapitalkosten	0.55	1.77	0.59
<b>Totalkosten der Variante pro Kilometer</b>	<b><u>7.45</u></b>	<b><u>9.21</u></b>	<b><u>7.82</u></b>
Mehrkosten pro Kilometer im Vergleich zu Diesel:		1.76	0.37
Mehrkosten Prozentual im Vergleich zu Diesel:		24%	5%

### Alternativ-Variante Unbegrenzte Biomasse

Keine Kostenrelevanz

### Sensitivität gegenüber der Einführung der CO2 Steuer

Kostenarten	Diesel	Trolley	Biogas
Fixe Betriebskosten (unabhängig von Anzahl gefahrener Kilometer)	0.41	0.94	0.45
Variable Betriebskosten (abhängig von Anzahl gefahrener Kilometer)	<u>1.12</u> +8	<u>1.05</u>	<u>1.25</u>
Totale Betriebskosten	1.53	1.99	1.70
Personalkosten Fahrer der Linie 4 pro Jahr (inkl. Lohnnebenkosten)	5.45	5.45	5.45
Total Kapitalkosten	0.55	1.77	0.59
<b>Totalkosten der Variante pro Kilometer</b>	<b><u>7.53</u></b>	<b><u>9.21</u></b>	<b><u>7.75</u></b>
Mehrkosten pro Kilometer im Vergleich zu Diesel:		1.68	0.22
Mehrkosten Prozentual im Vergleich zu Diesel:		22%	3%

### Sensitivität gegenüber der Abschreibung auf CHF 0.- in 12 Jahren

Kostenarten	Diesel	Trolley	Biogas
Fixe Betriebskosten (unabhängig von Anzahl gefahrener Kilometer)	0.41	0.94	0.45
Variable Betriebskosten (abhängig von Anzahl gefahrener Kilometer)	<u>1.04</u>	<u>1.05</u>	<u>1.25</u>
Totale Betriebskosten	1.45	1.99	1.70
Personalkosten Fahrer der Linie 4 pro Jahr (inkl. Lohnnebenkosten)	5.45	5.45	5.45
Total Kapitalkosten	<u>0.59</u> +4	<u>2.29</u> +52	<u>0.63</u> +4
<b>Totalkosten der Variante pro Kilometer</b>	<b><u>7.49</u></b>	<b><u>9.73</u></b>	<b><u>7.79</u></b>
Mehrkosten pro Kilometer im Vergleich zu Diesel:		2.24	0.30
Mehrkosten Prozentual im Vergleich zu Diesel:		30%	4%

### Sensitivität gegenüber der Verbilligung von Strom aufgrund der Strommarktliberalisierung (Kostenreduktion von 20%)

Kostenarten	Diesel	Trolley	Biogas
Fixe Betriebskosten (unabhängig von Anzahl gefahrener Kilometer)	0.41	0.94	0.45
Variable Betriebskosten (abhängig von Anzahl gefahrener Kilometer)	<u>1.04</u>	<u>0.99</u> -6	<u>1.25</u>
Totale Betriebskosten	1.45	1.93	1.70
Personalkosten Fahrer der Linie 4 pro Jahr (inkl. Lohnnebenkosten)	5.45	5.45	5.45
Total Kapitalkosten	0.55	1.77	0.59
<b>Totalkosten der Variante pro Kilometer</b>	<b><u>7.45</u></b>	<b><u>9.15</u></b>	<b><u>7.75</u></b>
Mehrkosten pro Kilometer im Vergleich zu Diesel:		1.70	0.30
Mehrkosten Prozentual im Vergleich zu Diesel:		23%	4%

## A5 Alternativen der Gasbetankung

Zur exakten Beurteilung der Kosten einer Betankungsanlage ist eine detaillierte Evaluation der situativen technischen Möglichkeiten und Anforderungen nötig, die den Rahmen dieser Studie sprengt. Es sollen hier aber indikativ verschiedene Möglichkeiten und ihr ungefährender Kostenrahmen dargestellt werden. Plausibilität wird erreicht durch den Vergleich der drei Varianten unter sich und durch den Vergleich mit dem Biogaspreis ab Tankstelle der Erdgas Zürich.

### Kalkulation der Kosten und Beurteilung der alternativen Gasbetankungsanlagen:

Im Kanton Zürich speisen Kompogasanlagen eine gewisse Menge Biogas ins Erdgasnetz ein. Für diesen Anteil werden Kontingente vergeben, die dann zum Bezug von steuerbefreitem Biogas aus dem Erdgasnetz berechtigen. Faktisch bezieht man jedoch nicht Biogas, sondern Erdgas mit einem kleinen Anteil Biogas, wie alle anderen Bezüger auch. Beide Gase unterscheiden sich technisch nicht und werden bei der Einspeisung vermischt. Im ganzen Kanton Zürich gibt es ein gut ausgebauten Erdgasnetz. Die beiden Busdepots der Winterthurer Verkehrsbetriebe stehen unmittelbar an einer Erdgasleitung mit einem Druck von bis 2 Bar. Es ist in Oberwinterthur eine öffentliche Erdgastankstelle vorhanden, die sich jedoch nur für Personenwagen eignet. Der Bedarf an Gas der beiden Busse übersteigt die Kapazität dieser Tankstelle. Aus diesem Grund müssen andere Möglichkeiten der Betankung in Betracht gezogen werden:

#### Alternative 1: Renovation einer bestehenden Tankstelle auf dem Sulzerareal in Oberwinterthur

Total Investitionskosten:	0	CHF <sup>1)</sup>
Annuitätsrate pro Jahr (5% Zins, 12 Jahre)	0	CHF
Verbrauch total in 1 Jahr	62'050	kg Biogas
Investitionskosten pro kg Gas:	0.00	CHF/ kg
Bezugskosten Biogas:	1.19	CHF/ kg <sup>2)</sup>
Betankungsaufwand (Fahrt zur Tankstelle):	0.21	CHF/ kg <sup>3)</sup>
Wartung und Unterhalt:	0.00	CHF/ kg
Übrige Kosten:	0.00	CHF/ kg
<b>Totalkosten pro kg:</b>	<b>1.40</b>	<b>CHF/kg</b>

1) Die bestehende Schnellbetankungsanlage auf dem Areal der Sulzer Burhart ist ein älterer Prototyp. Um Busse zu betanken, sind Investitionen in der Grössenordnung von CHF 120'000.- notwendig. Die Winterthurer Gaswerke haben zugesagt, diese Tankstelle im Falle einer Beschaffung von Gasbussen durch die Winterthurer Verkehrsbetriebe zu sanieren. Diese Tankstelle wäre öffentlich zugänglich und könnte ca. 6 Busse schnellbetanken.

2) Die Anlage ist in Fremdbesitz. Die Bezugskosten für Biogas entsprechen dem üblichen Bezugspreis für Endkunden an Biogastankstellen von Erdgas Zürich (CHF 1.19).

3) Zeit für die Hin- und Rückfahrt dauert 30 Minuten für beide Busse (zum Betanken von 170 kg Gas). Bei einem Stundensatz für Chauffeure von CHF 70.- kostet das pro kg Gas CHF 0.21.

#### Alternative 2: Erstellen einer Langsamtankstelle für 2 Busse im eigenen Depot

Total Investitionskosten:	144'000	CHF <sup>1)</sup>
Annuitätsrate pro Jahr (5% Zins, 12 Jahre)	16'247	CHF
Verbrauch total in 1 Jahr	62'050	kg Biogas
Investitionskosten pro kg:	0.26	CHF/ kg
Wartung und Unterhalt:	0.07	CHF/ kg
Bezugskosten Biogas:	0.80	CHF/ kg <sup>2)</sup>
Übrige Kosten (Strom...)	0.07	CHF/ kg
Betankungsaufwand (Fahrt zur Tankstelle)	0.00	CHF/ kg <sup>3)</sup>
<b>Totalkosten pro kg:</b>	<b>1.20</b>	<b>CHF/kg</b>

1) Es kann mit Investitionskosten von 120'000.- für die Langsambetankungsanlage auf dem eigenen Areal gerechnet werden. Eine solche Tankstelle wird über ca. 10 Jahre abgeschrieben. Der Betrachtungshorizont dieser Studie beträgt 12 Jahre, aus diesem Grund wird hier von Investitionen von CHF 144'000.- ausgegangen. Die Busse werden über Nacht 6 Stunden an eine Langsambetankungsanlage (50m<sup>3</sup>/h) angeschlossen. Die Anlage funktioniert ohne manuelle Überwachung. Technische Überwachungsgeräte und bauliche Massnahmen, die die Sicherheit der Anlage garantieren, sind in den Investitionskosten inbegriffen.

2) Die Bezugskosten für Biogas inklusive MWST. nach Angaben des Winterthurer Gasversorgers.

3) Der Betankungsvorgang läuft automatisch und ist im Vergleich zum Dieselbus nicht zeitintensiver.

**Alternative 3: Erstellen einer Schnellbetankungsanlage für 8 Busse im eigenen Depot**

Total Investitionskosten:	480'000	CHF <sup>1)</sup>
Annuitätsrate pro Jahr (5% Zins, 12 Jahre)	54'156	CHF
Verbrauch total in 1 Jahr	<u>248'200</u>	kg Biogas
Investitionskosten pro kg:	0.22	CHF/ kg
Wartung und Unterhalt:	0.05	CHF/ kg <sup>2)</sup>
Bezugskosten Biogas:	0.80	CHF/ kg
Übrige Kosten (Strom...)	0.05	CHF/ kg <sup>2)</sup>
Betankungsaufwand (Fahrt zur Tankstelle)	<u>0.00</u>	CHF/ kg <sup>3)</sup>
<b>Totalkosten pro kg:</b>	<b>1.12</b>	<b>CHF/kg</b>

1) Die hier angenommene Schnellbetankungsanlage ist ausgelegt auf 8 Busse, was dem heute effizientesten Layout einer Tankstelle entspricht. Es kann mit Investitionskosten von 400'000.- gerechnet werden. Eine solche Tankstelle wird über ca 10 Jahre abgeschrieben. Der Betrachtungshorizont dieser Studie beträgt 12 Jahre, aus diesem Grund wird hier von Investitionen von CHF 480'000.- ausgegangen. Die errechneten Kosten pro kg ergeben sich nur bei einer guten Auslastung der Anlage (8 Busse).

2) Wartung, Unterhalt und übrige Kosten pro kg Tankgut liegen bei dieser grossen Anlage tiefer als bei Alternative 2.

3) Der Betankungsvorgang ist kurz (ca 5-7 min). Er ist somit im Vergleich zum Dieselbus nicht viel zeitintensiver

**Zusammenfassende Beurteilung:**

Die Alternative 1 ist ohne eigene Investition auf fremdem Terrain realisierbar. Die Abhängigkeit von den Gaswerken ist nicht problematisch, allerdings sind die Kosten für die Fahrten zur Tankstelle nach Oberwinterthur nicht zu vernachlässigen und führen zu relativ hohen Kosten pro kg Gas (CHF 1.40). Demgegenüber beinhalten die Varianten 2 und 3 das Errichten einer eigenen Anlage in einem der beiden Depots, welche an einer Gasleitung stehen. Das Erstellen einer eigenen Langsambetankungsanlage (Variante 2) ist mit Sicherheitsauflagen verbunden, die vor einer Realisierung genauer untersucht werden müssten (nicht manuell überwacht Betanken über Nacht). Es wird jedoch davon ausgegangen, dass aufgrund der Lage und Qualität der Busdepots eine Realisierung machbar ist. Die Kosten für ein Kilogramm Gas ab Tankstelle bei der Alternative 2 (CHF 1.20) liegen sehr nahe beim Endkunden-Preis der Biogastankstellen von Erdgas Zürich (CHF 1.19)<sup>1)</sup>. Die Alternative 3 (Grosse Schnellbetankungsanlage) weist das niedrigste Kostenniveau pro kg getanktem Gas auf (CHF 1.12), welches bei einer Auslegung auf 8 Busse erreichbar ist. Diese Anzahl von 8 Bussen ist aus Kostensicht bezüglich Schulung, Wartung, Betankung usw. als minimal zu betrachten. Es wäre deshalb sinnvoll, in einem entsprechenden Umfang in diese Technologie zu investieren. In der vorliegenden Studie werden jedoch die realistischen Kosten für die zwei Busse der Linie 4 berechnet, und somit die Alternative 2 mit Kosten von CHF 1.20 pro kg Gas ab Tankstelle berücksichtigt.

1) Dieser Vergleich zeigt ungefähr die Grössenordnung, auch wenn die interne Kostenrechnung eines Tankstellenbetreibers mit dem Marktpreis eines Anderen nicht direkt vergleichbar ist, da die Kostenstruktur bei den beiden Unternehmen unterschiedlich ist. So hat Erdgas Zürich Kosten für Finanztransaktionssysteme (EC-Terminal), eine unterschiedliche Auslastung, einen eher tieferen Rohstoffpreis etc. Der Marktpreis muss auch nicht exakt den internen Kosten entsprechen).