

# **Dieselbus, Trolleybus oder gar Erdgasbus? Beispiel eines ökonomisch-ökologischen Vergleichs**

Autor(en): **Klooz, Daniel / Leutenegger, Thomas**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **114 (1996)**

Heft 26

PDF erstellt am: **10.08.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-78996>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Wassererwärmung – von 5,2. Als Kältemittel wird halogenfreies R1270 eingesetzt.

### Wärmerückgewinnung aus dem Abwasser

Kernstück der Anlage zur Rückgewinnung von Wärme aus dem Grauwasser ist ein Wärmetauscher, der aus einem Sammelbehälter mit einer deutlichen Temperaturschichtung und einem diesen Behälter umhüllenden Rohrregister besteht. Die Wärme gelangt aus dem Grauwasserbehälter in den wasserführenden Stahlrohrmantel und durch Schwerkraftzirkulation in den höher liegenden Vorboiler. Dieser speist den Hauptboiler, in dem die Nachwärmung auf etwa 50 °C über die Wärmepumpe erfolgt. Dieses System hätte einen grundsätzlichen Nachteil: Da das Warmwasser beim Zapfen im Verhältnis 1:1 mit Kaltwasser vermischt wird, fällt das Grauwasser nur halbwarm, aber in doppelter Menge an – im Vergleich zum Warmwasser. Damit ist ein theoretischer Wirkungsgrad bei der Grauwasser-WRG von höchstens 50% möglich. Der Ersatz eines Teils des Kalt- und des Warmwas-

sernetzes durch ein Lauwarmwassernetz erhöht den frischwasserseitigen Durchsatz im Rohrregister des Wärmetauschers und verbessert den Wirkungsgrad des Systems. Ein praktischer Wirkungsgrad von gegen 50% scheint nach den ersten Erfahrungen realistisch.

Der Abfluss in die Kanalisation ist sozusagen das letzte Energieloch, das im konsequenten Niedrigenergiebau zu stopfen ist. Ob der in Grüningen eingebaute Prototyp die Hoffnungen erfüllt, werden Messungen zeigen. Nach den Vorstellungen der Konstrukteure könnte das Gerät in zwei Jahren in Serie gehen. In Erwartung dieser Innovation sollten beim Bau von Niedrigenergiehäusern zwei Vorkehrungen getroffen werden: Das Grauwasser – Abwasser ohne WC und Küche, aber mit Wasch- und Abwaschmaschine – sollte separat geführt werden. Es empfiehlt sich zudem, die Kalt- und Warmwasserverteiler zentral und gut zugänglich anzuordnen, um später einen Teil der Leitungen als Lauwarmwassernetz betreiben zu können.

Adresse des Verfassers:

Othmar Hunn, Fachjournalist Technik und Energie, 8050 Zürich

### P+D – ein Teil von Energie 2000

Das Haus Hansenburg in Grüningen ist ein Pilot- und Demonstrationsprojekt des Kantons Zürich und des Bundesamtes für Energiewirtschaft im Rahmen des schweizerischen Aktionsprogrammes Energie 2000. Das Gebäude soll, ebenfalls mit Unterstützung des Kantons und des Bundes, in der nächsten Heizperiode ausgemessen werden. Beim Messprojekt geht es weniger um die Verifizierung der tiefen Energieverbrauchswerte als um die Bewertung der einzelnen Technologien – Wärmedämmung, Wohnungslüftung, Speicherverhalten, solarer Direktgewinn und Wärmerückgewinnung – als Beitrag zu einem Niedrigenergiehausbau, der alle neuzeitlichen Ansprüche an Komfort und Behaglichkeit erfüllt. Die Messungen werden von der Koordinationsstelle für Wärmeforschung im Hochbau an der Empa begleitet.

### Beteiligte

Bauherrschaft, Architektur und Energiekonzept: *Rudolf Fraefel*, dipl. Architekt ETH/SIA, Hansenburg 6, 8627 Grüningen

Heizungs- und Sanitärplanung: *Haustechnik Rochberger*, 8050 Zürich

Lüftungsplanung: *Rudolf Fraefel*

Wärmerückgewinnung aus dem Grauwasser-System: *Dr. Ruedi Kriesi* und *Rudolf Fraefel*

Daniel Kloor, Winterthur, Thomas Leutenegger, Zollikon

## Dieselbus, Trolleybus oder gar Erdgasbus?

### Beispiel eines ökonomisch-ökologischen Vergleichs

**Die Frage, ob auf einer Buslinie des öffentlichen Verkehrs Dieselbusse, Erdgasbusse oder Trolleybusse eingesetzt werden sollen, lässt sich nicht ohne weiteres beantworten. Trolleybusse sind vergleichsweise emissionsarm, aber bezüglich Betrieb relativ teuer. Andererseits sind Busse mit Antriebssystemen auf der Basis fossiler Energieträger (z.B. Dieselöl oder Erdgas) kostengünstiger, weisen jedoch im Vergleich zu Trolleybussen Nachteile bei den Umweltwirkungen auf.**

### Ausgangslage und Zielsetzung

Diese Frage stellte sich auch den Winterthurer Verkehrsbetrieben, die eine ihrer bestehenden Trolleybuslinien, die soge-

nannte Breite-Linie, aus Altersgründen vollständig (Busse und Fahrleitung) erneuern müssen. Die Bedeutung dieser Fragestellung reicht jedoch über die Stadt Winterthur hinaus, da z.B. im Massnahmenplan Lufthygiene des Kantons Zürich [1] und auch in anderen Kantonen vorgeschlagen wird, Dieselbusse aus lufthygienischen Gründen wenn möglich durch Trolleybusse zu ersetzen.

Die Umweltschutzfachstelle der Stadt Winterthur hat deshalb die verschiedenen Busantriebssysteme – Trolleybus, Erdgasbus, Dieselbus – in einem ökonomischen und ökologischen Vergleich durch das Ingenieurunternehmen E. Basler & Partner evaluieren lassen. Ziel des Vergleichs ist es, eine Entscheidungsgrundlage für die Bus-systemwahl bereitzustellen, die sowohl die Systemkosten als auch die System-Umweltwirkungen als Parameter berücksich-

tigt. Der Vergleich wurde konkret am Fallbeispiel der Winterthurer Breite-Linie durchgeführt. Die Methodik kann jedoch auch für andere Buslinien angewendet werden. Der Bericht, welcher den Vergleich dokumentiert, enthält im Anhang alle wesentlichen Grundlagen für die Adaption der Methodik auf andere Buslinien [2].

### Überblick über das methodische Vorgehen

#### Hinweise zum Vorgehen

Der Vergleich der drei verschiedenen Bussysteme erfolgt aufgrund einer Gegenüberstellung ihrer Kosten und ihrer Umweltbelastungen. Dabei werden nur diejenigen Umweltbelastungen in den Vergleich einbezogen, in welchen sich die einzelnen Antriebsvarianten signifikant unterscheiden. Die Umweltbelastungen, ausgedrückt in Umweltbelastungspunkten, ermöglichen den Vergleich und die Bewertung der verschiedenen Umweltwirkungen der drei Busantriebssysteme auf der Basis des Prinzips der ökologischen Knappheit.

Damit der Vergleich der einzelnen Umweltwirkungen miteinander möglich

ist, müssen diese aufgrund ihrer Schädlichkeit gewichtet werden. Die Gewichtung erfolgt nach der Buwal-Ökobilanz-Methode [5]. Als Mass für die Schädlichkeit dient die sogenannte ökologische Knappheit des Mediums, in welches die Emissionen abgegeben werden. Die Knappheit wird mit dem Ökofaktor ausgedrückt. Dieser ist abhängig vom heutigen Ausstoss (Ist-Fluss der Emissionen) und vom Fluss, der durch das Umweltmedium langfristig verkraftbar ist (kritischer Fluss). In der Praxis ist es nicht möglich, die kritischen Flüsse aufgrund von naturwissenschaftlich exakt ermittelten Grenzwerten festzulegen. Für deren Bestimmung werden deshalb gesetzlich vorgeschriebene Grenzwerte oder umweltpolitische Zielvorstellungen herangezogen. Diese beruhen letztlich jedoch immer auf politischen Entscheiden und widerspiegeln die heutigen gesellschaftlichen Wertvorstellungen. Trotzdem hat sich die Ökobilanz-Methodik in der Praxis bei Fragestellungen der hier vorliegenden Art bewährt. Die Ökofaktoren für die im folgenden Kapitel untersuchten Emissionen sind in Tabelle (1) dargestellt.

Beim gewählten Vorgehen werden die Partikel- und Lärmemissionen verhältnismässig stark gewichtet. Im Falle des Lärms ist dies in erster Linie eine Folge der generell zu hohen Lärmbelastung in den Städten der Schweiz. Bei den Partikeln ist die starke Gewichtung darauf zurückzuführen, dass deren Konzentration in der Luft zur Reduktion des Krebsrisikos drastisch gesenkt werden müsste [4, 5, 6].

Die Umweltbelastungspunkte pro km und Emissionsart für jede der Bussystemvarianten erhält man, indem die Ökofaktoren mit den Emissionen pro km multipliziert werden.

## Kosten und Umweltbelastungen

### Umweltbelastungen

Im Vergleich wird unterschieden zwischen Emissionen mit lokaler Wirkung und solchen mit globaler Wirkung (Treibhausgase). Emissionen mit lokaler Wirkung sind

- NO<sub>x</sub> (Stickoxide)
  - VOC (flüchtige organische Verbindungen)
  - SO<sub>2</sub>
  - Partikel und
  - Lärm
- Charakteristisch für diese Emissionen ist, dass sie beim Menschen direkte gesundheitliche Wirkungen haben können.

Emissionen mit globaler Wirkung sind die Treibhausgase

- CO<sub>2</sub> (Kohlendioxid) und
- CH<sub>4</sub> (Methan)

	Emission	Ökofaktor [Belastungspunkte/g] bzw. [Belastungspunkte/km] für Lärm
<b>Luftschadstoffe:</b>	NO <sub>x</sub>	28,2
	VOC	11,1
	SO <sub>2</sub>	18,4
	Partikel	22 500
	CO <sub>2</sub>	0,025
	CH <sub>4</sub>	4,2
<b>Lärm:</b>	Trolley- und Gasbus	140
	Dieselbus	1550

1  
Ökofaktoren als Mass für die ökologische Knappheit des durch die Emission belasteten Mediums

Die Treibhausgase haben bei den heute auftretenden Konzentrationen keine direkten gesundheitlichen Folgen für den Menschen. Sie beeinflussen jedoch das globale Klima.

Die Ermittlung der Umweltwirkungen muss aufgrund der Orte ihrer Einwirkung innerhalb zweier unterschiedlicher Systemgrenzen erfolgen: Im lokalen Perimeter (im Fallbeispiel die Stadt Winterthur) werden diejenigen Emissionen betrachtet, die durch den Betrieb der Buslinie vor Ort selber anfallen. Ein Trolleybus beispielsweise verursacht in diesem Perimeter nur Lärm-, jedoch keine Schadstoff-Emissionen. Im globalen Perimeter werden die Emissionen, die durch die vorgelagerten Prozesse verursacht werden, in den Vergleich miteinbezogen. Diese Emissionen fallen an bei der Produktion der benötigten Energie und bei ihrer Anlieferung zum Bussystem. Im Systemvergleich werden beim Trolleybus die Emissionen der oben erwähnten Schadstoffe für die Stromproduktion und -anlieferung auf Mittelspannungsniveau berücksichtigt. Da die Schweiz Bestandteil des gesamteuropäischen Stromverbundes ist, wird dem Vergleich der europäische Mix für die Stromproduktion, der sogenannte UCPT-E-Mix (Union pour la coordination de la production et du transport de l'électricité), zugrundegelegt. Dieser Mix berücksichtigt, dass in Europa Strom zu fast 50% aus fossilen Energieträgern (Kohle, Erdöl, Erdgas) produziert wird. Beim Dieselbus sind es die Schadstoff-Emissionen für die Produktion und den Transport von Dieselöl bis zum Regionallager und beim Gasbus diejenigen bis zum Bezug ab Ortsgasversorgung. Die Emissionen der grauen Energie für die Erstellung der notwendigen Infrastruktur für die Energieproduktion und -verteilung (Kraftwerke, Pipelines, Strommasten, ...) werden im Vergleich berücksichtigt. Die graue Energie, welche in den Bussen selber enthalten ist, wird nicht berücksichtigt, da sich die Antriebsvarianten in diesem Punkt nur unwesentlich unterscheiden.

### Kosten

Für den Vergleich werden für jede der drei Antriebsvarianten die durchschnittlichen Kosten pro km ermittelt. Berücksichtigt werden dabei

- die Investitionskosten für neue Fahrzeuge
- die Investitionskosten für neue Fahrleitungen beim Trolleybussystem
- die Investitionskosten für die Gasbetankungsanlage beim Erdgasbussystem und
- die fixen und variablen Kosten für Betrieb und Unterhalt.

### Wie sicher sind Gasbusse?

Die Sicherheitsfragen im Zusammenhang mit Gasbussen wurden eingehend untersucht. Der Stand des Wissens ist heute wie folgt:

- Die *Betriebssicherheit* von Gasbussen ist beim heutigen technischen Stand derjenigen von Dieselbussen gleichwertig. Sicherheitstechnische Untersuchungen der normalerweise auf dem Dach installierten Gasdruckbehälter haben ergeben, dass sie weder für die Fahrgäste noch für andere Verkehrsteilnehmer eine Gefahr bilden.
- Bei Einhaltung der Normen für Erstellung, Betrieb und Unterhalt von Erdgasbetankungsanlagen des Schweizerischen Vereins des Gas- und Wasserfachs entstehen bei *Gastankstellen* keine Sicherheitsprobleme.
- Der Verein Kantonaler Feuerversicherungen hat die Problematik der *Garagierung* von Gasbussen in bestehenden Einstellhallen untersucht. Er ist zum Schluss gekommen, dass sich aus heutiger Sicht keine weitergehenden brandschutztechnischen Anforderungen aufdrängen.

Zusammenfassend muss festgestellt werden, dass die ursprünglich bestehende Unsicherheit über allenfalls zusätzlich entstehende Kosten aus speziellen Sicherheitsanforderungen beim Einsatz von Erdgasbussen heute ausgeräumt ist. Im Betrieb und bei der Garagierung ist die Sicherheit von Erdgasbussen und Dieselbussen beim heutigen technischen Stand gegeben und gleichwertig [8, 9].

Perimeter	Schadstoff	Emissionen für die Breite-Linie [t/Jahr]		
		Dieselbus	Gasbus	Trolleybus
Winterthur	NO <sub>x</sub>	2,4	0,9	0
	CO <sub>2</sub>	228	232	0
Erde (inkl. Winterthur)	NO <sub>x</sub>	2,6	1,0	0,3
	CO <sub>2</sub>	254	261	154

2

Schadstoff-Emissionen der untersuchten Bussysteme auf der Winterthurer Breite-Linie in Tonnen pro Jahr

### Fallbeispiel: Winterthurer Breite-Linie

#### Charakteristik der Linie

Die sogenannte Breite-Linie (Buslinie Nr. 4) ist ein relativ kurzer, 4,7 km langer Rundkurs, bei dem die Busse in der Regel im Gegenuhrzeigersinn zwischen dem Winterthurer Hauptbahnhof und dem Quartier «Breite» verkehren. Bis vor kurzem sind im Normalbetrieb insgesamt zwei Trolleybusse eingesetzt worden. Seit wenigen Monaten fahren, aufgrund von Verkehrsumleitungen infolge von Bauarbeiten, Dieselbusse auf dieser Linie. Insgesamt erbringen die Busse eine jährliche Fahrleistung von 209 000 km. Mit einer durchschnittlichen Auslastung von 4 Personen pro Fahrzeug sind die Passagierfrequenzen sehr gering. Bisher sind aufgrund der zum Teil sehr engen Strassenverhältnisse und der ungünstigen Topographie mit Steigungen von bis zu 9% nur zweiachsige Solobusse zum Einsatz gekommen.

#### Umweltwirkungen

##### Schadstoff-Emissionen

Zur Ermittlung der Schadstoff-Emissionen der drei Busantriebssysteme auf der Breite-Linie wurde angenommen, dass es sich dabei um Fahrzeuge neuester Technologie handelt (Dieselbusse halten Euro-2-

Norm ein, Gasbusse verfügen über Dreiweg-Katalysatoren). Gemessen an den NO<sub>x</sub>-Emissionen ist der Dieselbus mit Abstand die ungünstigste der drei Varianten (2). Die CO<sub>2</sub>-Emissionen sind dagegen beim Gasbus leicht höher als beim Dieselbus, da der Dieselmotor einen besseren Wirkungsgrad aufweist. Der geringere Kohlenstoff-Gehalt von Erdgas wird so kompensiert. Im Perimeter Erde verursacht auch der Trolleybus aufgrund des teilweise durch fossile Energieträger erzeugten Stroms relevante CO<sub>2</sub>-Emissionen.

##### Lärm

Die eidgenössische Lärmschutzverordnung (LSV) [10] unterscheidet zwischen lauten und leisen Fahrzeugen. Trolleybusse werden zu den leisen Fahrzeugen gezählt. Die lärmässige Zuordnung der Diesel- und Gasbusse ist in der Verordnung nicht geregelt.

Lärmmessungen bei der Breite-Linie haben gezeigt, dass Dieselbusse bei der Abfahrt von einer Haltestelle in einer Steigung rund 9 dBA lauter sind als Trolleybusse. Im Vergleich wird deshalb der Dieselbus analog zu Lastwagen zu den lauten Fahrzeugen gerechnet. Gasbusse werden zu den leisen Fahrzeugen gezählt, da diese gemäss ersten Erfahrungen rund 3 bis 4 dBA leiser sind als Dieselbusse.

Bei einer Umstellung der Breite-Linie von Trolleybussen auf Dieselbusse erhöht sich der Anteil der lauten Fahrzeuge, und somit nehmen auch die Lärmemissionen zu. Nur in den wenig belasteten Strassenabschnitten liegt diese Zunahme mit rund 1 dBA im Bereich der Wahrnehmbarkeitsschwelle. Die meisten Abschnitte weisen wegen des hohen Verkehrsaufkommens bereits eine hohe Lärmbelastung auf, so dass eine Umstellung auf Dieselbusse praktisch keine Auswirkungen hätte. Bei einer Umstellung des Betriebs auf Gasbusse ergibt sich keine Veränderung der Lärmbelastung im Vergleich zum Trolleybusbetrieb.

#### Umweltbelastungen

Aus den Umweltbelastungen der drei Bussysteme, ausgedrückt in Umweltbelastungspunkten (3), geht deutlich hervor, dass die lokalen Umweltwirkungen einen weitaus grösseren Stellenwert einnehmen als die globalen. Dies ist speziell auf die starke Gewichtung der Partikel- und Lärmemissionen zurückzuführen. Der Einbezug der vorgelagerten Prozesse (Perimeter Erde) erhöht die gesamte Umweltbelastung nur unwesentlich. Nur bei den Treibhausgasen sind dadurch relevante Zunahmen festzustellen.

Unabhängig vom betrachteten Perimeter verursacht die Variante «Dieselbus», sowohl insgesamt gesehen als auch bei den Emissionen mit lokalen Wirkungen, die grössten, die Variante «Trolleybus» die geringsten Umweltbelastungen. Bei den Treibhausgasen schneidet die Variante «Gasbus» sowohl bei den Emissionen in Winterthur als auch bei denjenigen unter Einbezug der vorgelagerten Prozesse (Perimeter Erde) am schlechtesten ab.

#### Kosten

Die Kosten gründen auf der Annahme, dass bei jeder Variante neue Fahrzeuge beschafft werden, welche bezüglich Umweltwirkungen optimiert sind und dem neuesten Stand der Technik entsprechen.

Der Dieselbus ist sowohl bezüglich der Fahrzeugkosten als auch bezüglich der Totalkosten am günstigsten (4). Beim Gasbus sind die Fahrzeugkosten um 16% höher als beim Dieselbus. Bei den variablen Kosten ist die Kostendifferenz auf die höheren Treibstoffpreise und den grösseren Treibstoffverbrauch verglichen mit den Dieselfahrzeugen zurückzuführen. Bei den Fixkosten sind die Mehraufwände in den höheren Anschaffungskosten sowie den Zusatzaufwendungen infolge Installation und Unterhalt einer Betankungsanlage für die Gasbusse begründet.

Der Trolleybus verursacht die höchsten Kosten. Berücksichtigt man lediglich

3

Umweltbelastungspunkte pro km für die drei untersuchten Bussysteme auf der Winterthurer Breite-Linie

Perimeter	Emissionen	Umweltbelastungspunkte pro km für die Breite-Linie		
		Dieselbus	Gasbus	Trolleybus
Winterthur	<b>lokale Schadstoffe</b> (NO <sub>x</sub> , VOC, SO <sub>x</sub> , Partikel) + Lärm	11 344	1 855	140
	<b>Treibhausgase</b> (CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> )	27	28	0
	<b>Total</b>	11 371	1 881	140
Erde (d.h. inkl. vorgelagerte Prozesse)	<b>lokale Schadstoffe</b> (NO <sub>x</sub> , VOC, SO <sub>x</sub> , Partikel) + Lärm	11 420	1 885	257
	<b>Treibhausgase</b> (CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> )	37	62	26
	<b>Total</b>	11 457	1 947	283

die Fahrzeugkosten, resultieren, verglichen mit dem Dieselbus, 71% höhere Kosten. Die höheren Kosten sind auf die zusätzlichen Ausgaben für die Fahrleitung und den höheren Preis der Fahrzeuge zurückzuführen. Diese Mehrkosten als Folge des höheren Anschaffungspreises werden jedoch teilweise durch tiefere Abschreibungskosten pro Jahr (längere Lebensdauer der Trolleybusse) kompensiert.

Die Differenzen bei den Totalkosten der drei Bussysteme sind wesentlich kleiner. Dies ist bedingt durch den hohen und für alle Varianten frankenmässig gleich grossen Personalkostenanteil, der im Bereich von 60 bis 70% der Totalkosten liegt.

#### Systemvergleich unter Berücksichtigung von Kosten und Umweltbelastung

Als Bezugsbasis für den relativen Systemvergleich wird die Variante Dieselbus gewählt (100% Kosten, 100% Umweltbelastung). Da sich die Umweltbelastungen, ausgedrückt in Umweltbelastungspunkten, in den Perimetern Winterthur und Erde nur unwesentlich unterscheiden, wird für den Vergleich der Perimeter Erde gewählt.

Berücksichtigt man die gesamten Umweltwirkungen, weist der Gasbus das vorteilhafteste Kosten-Wirksamkeits-Verhältnis auf. Gegenüber dem Dieselbus können die Umweltbelastungen mit nur 16% Mehrkosten um 85% reduziert werden. Der Trolleybus weist gegenüber dem Gasbus zwar eine um 15% tiefere Umweltbelastung auf; die Kosten sind aber demgegenüber um 55% höher (5).

Berücksichtigt man nur die Emissionen mit lokalen Wirkungen, so ist das Kosten-Wirksamkeits-Verhältnis praktisch identisch mit demjenigen für die gesamten Wirkungen (6). Damit wird der grosse Einfluss der Emissionen mit lokalen Wirkungen, speziell wegen der hohen Gewichtung der Lärm- und Partikel-Emissionen, deutlich.

Bei den globalen Wirkungen im Perimeter Erde schneidet der Gasbus v.a. wegen seiner gegenüber dem Dieselbus höheren Methan-Emissionen am schlechtesten ab (7). Von den anderen zwei Varianten ist der Dieselbus günstiger als der Trolleybus, da letzterer zwar 31% weniger Umweltbelastungen verursacht, dafür aber 71% mehr kostet. Der Einfluss der globalen Wirkungen auf die Gesamtbewertung ist allerdings wegen der geringen Gewichtung der Emissionen mit globaler Wirkung klein.

#### Stabilität des Vergleichsergebnisses

Der Vergleich basiert auf einem Modell mit Parametern, für deren Werte teil-

	Kosten pro Fahrzeug [sFr./km]		
	Dieselbus	Gasbus	Trolleybus
Energiekosten	0,19	0,27	0,19
übrige variable Kosten Fahrzeug	0,76	0,76	0,81
<b>Total variable Kosten Fahrzeug</b>	<b>0,95</b>	<b>1,03</b>	<b>1,00</b>
Fix- und Unterhaltskosten Fahrleitung	-	-	0,62
Kostenanteil Betankungsanlagen	-	0,12	-
übrige Fixkosten Fahrzeug	1,00	1,11	1,71
<b>Total Fixkosten Fahrzeug</b>	<b>1,00</b>	<b>1,23</b>	<b>2,33</b>
<b>Total Fahrzeugkosten</b>	<b>1,95</b>	<b>2,26</b>	<b>3,33</b>
<b>Personalkosten (Chauffeur)</b>	<b>4,40</b>	<b>4,40</b>	<b>4,40</b>
<b>Totalkosten</b>	<b>6,35</b>	<b>6,66</b>	<b>7,73</b>
<b>relative Mehrkosten im Vergleich zum Dieselbus</b>			
Fahrzeugkosten	-	16%	71%
Totalkosten	-	5%	22%

4

Kosten pro Fahrzeug für die untersuchten Bussysteme in Fr. pro km auf der Winterthurer Breite-Linie

weise Annahmen getroffen werden müssen, die mit Unsicherheiten behaftet sind. Es stellt sich deshalb die Frage, ob und wie stark das Resultat des Vergleichs durch Veränderungen in den Annahmen beeinflusst wird. Im Rahmen von Sensitivitätsanalysen sind deshalb der Einfluss von Änderungen bei den Kosten und bei den Umweltwirkungen auf das Ergebnis untersucht worden.

#### Einfluss von Änderungen bei den Kosten

Beim Kostenvergleich spielen nur die relativen Mehr- bzw. Minderkosten einer Variante gegenüber den beiden anderen Varianten eine Rolle. Die Sensitivitätsanalyse beschränkt sich deshalb auf die Klärung des Einflusses der Treibstoffpreise, der Kapitalkosten und beim Trolleybus der Kosten für die Fahrleitung.

#### • Treibstoffpreise

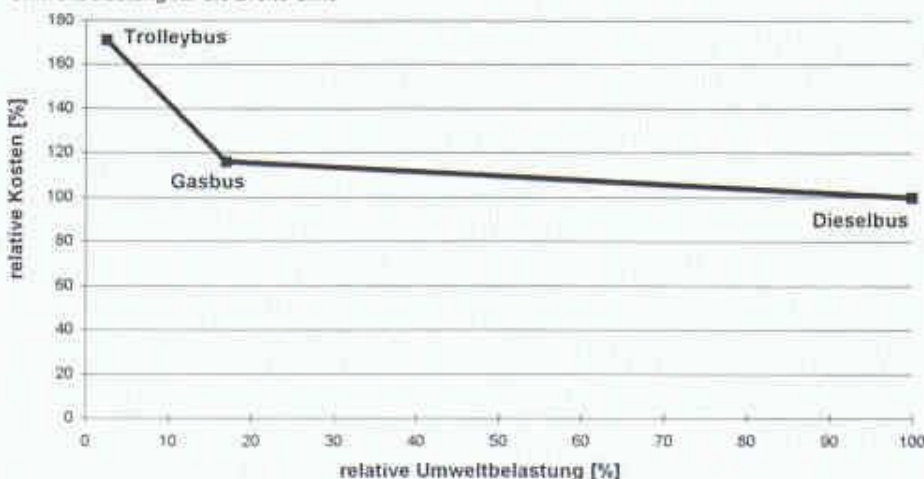
Die Treibstoffpreise machen nur einen Anteil von 6 bis 12% an den totalen Fahrzeugkosten pro km aus. Das Ergebnis des Systemvergleichs ist deshalb sehr stabil gegenüber Änderungen bei den Treibstoffpreisen. Eine Halbierung oder Verdoppelung des Strom-, Diesel- oder Gaspreises beeinflusst die Rangierung der drei Varianten bezüglich ihrer Kosten nicht.

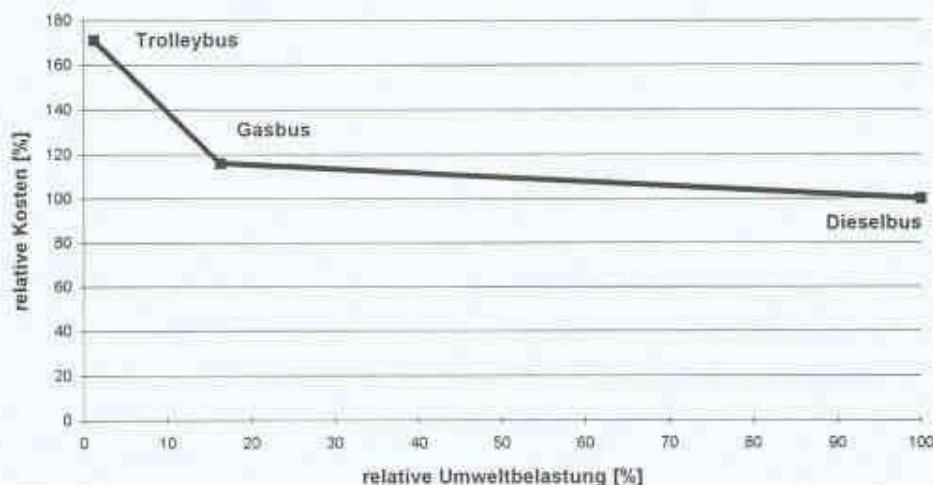
#### • Kapitalkosten

Die Variante Trolleybus bleibt sowohl bei einer Verdoppelung als auch bei einer Halbierung der Kapitalkosten die teuerste Variante. Beim Dieselbus verändert eine Halbierung der Kapitalkosten die Rangierung nicht. Ab einer Erhöhung der Kapitalkosten um mehr als 45% wird die Dieselbusvariante teurer als die Gasbusvariante.

5

Kosten-Wirksamkeits-Vergleich für die gesamte Umweltbelastung für die Breite-Linie





6

Kosten-Wirksamkeits-Vergleich für die Breite-Linie für Emissionen mit lokaler Wirkung

- Fahrleitungskosten  
Selbst wenn die Fahrleitungskosten nicht berücksichtigt werden, bleibt das Trolleybusssystem die teuerste Variante.

#### Einfluss von Änderungen bei den Umweltwirkungen

- Zusammensetzung der Energieträger für die Stromproduktion  
Im Vergleich zur europäischen Stromproduktion, die zu fast 50% auf fossilen Energieträgern basiert, verursacht die Stromproduktion in der Schweiz deutlich weniger für den Vergleich relevante Emissionen. Rund 57% des Stroms werden in der Schweiz durch Wasserkraftwerke und 41% durch Atomkraftwerke produziert. Wird die Stromproduktion im Vergleich mit dem Schweizer Mix gewichtet, so ändert sich die Rangfolge unter den Varianten nicht. Der Gasbus weist unter diesen Annahmen immer noch das günstigste Verhältnis zwischen Kosten und Umwelt-

belastungen auf. Dass sich die Rangfolge der Bussysteme untereinander nicht ändert, ist darauf zurückzuführen, dass die Umweltbelastung bei den Trolleybussen zu über 50% auf deren Lärmemissionen zurückzuführen ist. Die Gewichtung der Emissionen mit dem Schweizer Mix beeinflusst das Ergebnis somit nicht massgeblich.

- Partikel-Emissionen  
Die Partikel weisen im Modell das mit Abstand grösste Gewicht bei der Bewertung der einzelnen Umweltwirkungen auf. Die Bestimmung des kritischen Flusses ist mit relativ grossen Unsicherheiten behaftet, da unter Fachleuten keine Einigkeit bei der Beurteilung des Stellenwertes der Partikel-Emissionen besteht [5, 11]. Werden die Partikel-Emissionen bei der Bewertung überhaupt nicht berücksichtigt, nimmt die Umweltbelastung, gemessen in Umweltbelastungspunkten, beim Diesel- und beim Gasbussystem je um etwa 80% ab.

Der Gasbus verursacht nur noch geringfügig höhere Umweltbelastungen als der Trolleybus und weist deshalb gegenüber diesem ein noch besseres Verhältnis zwischen Kosten und Umweltbelastung auf. Die Rangfolge der Varianten untereinander bleibt jedoch unverändert.

- Lärmemissionen der Gasbusse  
Werden die Gasbusse im Vergleich statt als leise Fahrzeuge als laute Fahrzeuge im Sinne der LSV eingestuft, so resultiert für dieses Bussystem ein ungünstigeres Verhältnis zwischen Kosten und Umweltbelastungen. Trotzdem schneidet der Gasbus im Vergleich immer noch am besten ab.

#### Einfluss von Änderungen in der Bewertung der Umweltwirkungen

Die kritischen Flüsse zur Bestimmung der Ökofaktoren basieren auf dem Luftreinhaltekonzept des Bundes und anderen umweltpolitischen Zielvorstellungen. Mit den im Rahmen des Luftreinhaltekonzeptes angestrebten Reduktionen der  $\text{NO}_x$ - und VOC-Emissionen lassen sich jedoch die Immissionsgrenzwerte für Ozon ( $\text{O}_3$ ) nicht einhalten. Ebensovien lässt sich mit der im Rahmen von Energie 2000 angestrebten Stabilisierung der  $\text{CO}_2$ -Emissionen auf dem Niveau von 1990 das heutige globale Klima erhalten.

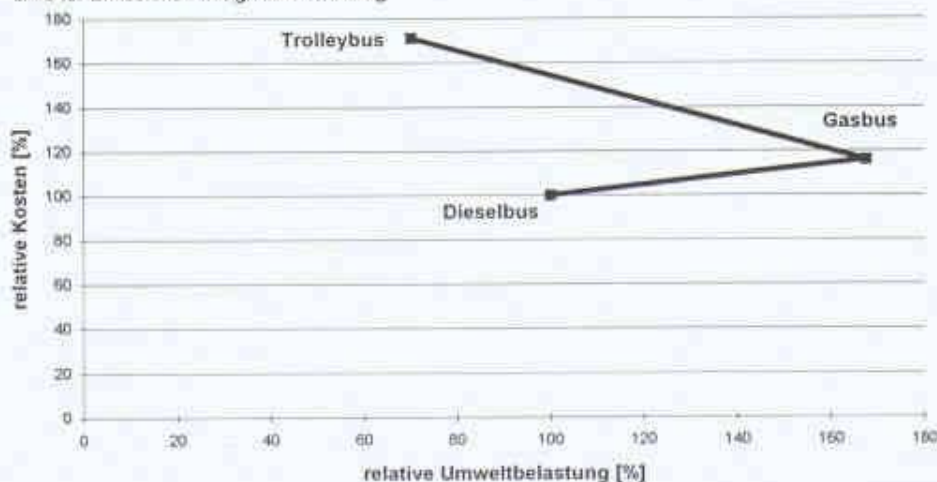
Zum Erreichen dieser langfristigen Umweltziele wären wesentlich grössere Reduktionen der Schadstoffflüsse notwendig, als sie den entsprechenden Konzepten des Bundesrates zugrunde liegen. Die kritischen Flüsse für die entsprechenden Schadstoffe ( $\text{NO}_x$ , VOC,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ) müssten deshalb kleiner und die Ökofaktoren und damit das Gewicht bei der Bewertung der Umweltwirkungen höher sein.

Werden die Emissionen der verschiedenen Varianten nach langfristigen Umweltzielen bewertet, so ändert sich das Ergebnis des Vergleiches nur unwesentlich. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Partikel- und Lärm-Emissionen, welche den grössten Anteil an der gesamten Umweltbelastung aufweisen, durch die Bewertung nach langfristigen Umweltzielen nicht verändert werden.

#### Schlussfolgerungen für die Winterthurer Breite-Linie

Der ökonomisch-ökologische Vergleich der drei Bussysteme für die Breite-Linie zeigt, dass der Dieselbus ökonomisch die günstigste Variante darstellt. Die Variante Gasbus ist mit 16% höheren Fahrzeugkosten bzw. 5% höheren Totalkosten pro km nur unwesentlich teurer. Bei der Variante Trolleybus fallen deutlich höhere Kosten pro km an.

7  
Kosten-Wirksamkeits-Vergleich für die Breite-Linie für Emissionen mit globaler Wirkung



Unter Einbezug der ökologischen Auswirkungen zeigt sich, dass die Variante Gasbus insgesamt das beste Verhältnis zwischen Kosten und Umweltbelastungen aufweist. Bei den lokal wichtigen Emissionen, wie z. B. Stickoxiden und Partikeln, sowie beim Lärm bringt der Gasbus gegenüber dem Dieselbus eine markante Verbesserung mit geringen Mehrkosten. Da die Treibhausgase gegenüber den lokalen Auswirkungen ein relativ geringes Gewicht haben, können die diesbezüglichen Nachteile des Gasbusses in dieser Hinsicht in Kauf genommen werden. Der Trolleybus schneidet zwar bezüglich Umweltbelastungen noch besser ab als der Erdgasbus, doch sind für diese verhältnismässig bescheidenen Verbesserungen relativ hohe Mehrkosten in Kauf zu nehmen.

Adresse der Verfasser:

Daniel Klotz, Dipl. Ing. ETH, Beauftragter für Umweltschutz und Energie der Stadt Winterthur, Obertor 32, 8402 Winterthur, Thomas Lentenberger, Dipl. Nat. ETH, Projektleiter, E. Basler und Partner, Zollikerstrasse 65, 8702 Zollikon

#### Literatur

- [1] *Regierungsrat des Kantons Zürich*: Luft - Programm für den Kanton Zürich, Massnahmenplan Lufthygiene, Kanton Zürich, Direktion der öffentlichen Bauten, Amt für Technische Anlagen und Lufthygiene, Zürich, April 1990
- [2] *Basler E. und Partner*: Systemvergleich zwischen Trolleybus, Dieselbus und Erdgasbus, Stadt Winterthur, Departement Sicherheit und Umwelt, Beauftragter für Umweltschutz und Energie, Winterthur, Oktober 1995
- [3] *Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (Buwal)*: Methodik für Ökobilanzen auf der Basis ökologischer Optimierung, Buwal - Schriftenreihe Umwelt Nr. 133, Bern, Oktober 1990
- [4] *Länderausschuss für Immissionschutz*: Krebsrisiko durch Luftverunreinigungen, Ministerium für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft des Landes Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf, 1992
- [5] *Straebl Peter, Wanner Hans-Urs*: Dieselmotorenabgase und Krebsrisiko, Neue Zürcher Zeitung, Zürich, 28. März 1995

- [6] *Straebl Peter, Wanner Hans-Urs*: Zum Krebsrisiko von Dieselmotorenabgasen, Neue Zürcher Zeitung, Zürich, 10. Oktober 1995
- [7] *Seifer Martin*: Persönliche Mitteilung vom 4. September 1995, Schweizerischer Verein des Gas- und Wasserfaches, Zürich
- [8] *Jacard Roland, Gerber Werner, Kuttler Marcel*: Projekt zur Inverkehrsetzung von 12 Erdgasbussen in Basel, Schweizerischer Verein des Gas- und Wasserfaches, Gas, Wasser, Abwasser, Nr. 6/95, Zürich, 1995
- [9] *Oester Ueli*: Probleme bei der Zulassung von Erdgastankstellen, Schweizerischer Verein des Gas- und Wasserfaches, Gas, Wasser, Abwasser, Nr. 6/95, Zürich, 1995
- [10] *Lärmschutz-Verordnung (LSV) vom 15. Dezember 1986 (SR 814.41)*
- [11] *Stöber Werner*: Zur vermuteten Kanzerogenität von Dieselschuss: Alarmrute als 'vorsorgliche Übertreibung'? Neue Zürcher Zeitung, Zürich, 6. Juni 1995

Stefan Batzli, Zürich

## Um- und Ausbau des Kantonsspitals in Olten

**Fassadensanierung mit hinterlüfteter Aussenisolation und matten Glasscheiben**

**Seit 1994 läuft etappenweise die Modernisierung des Kantonsspitals in Olten. Das Projekt umfasst die Sanierung der bestehenden Altbauten und die Schaffung neuer Anlagen. Zwischen Alt und Neu wird eine einheitliche Identität angestrebt. Die Fassadensanierung des Personalhauses verdient spezielle Aufmerksamkeit.**

Das solothurnische Kantonsspital liegt auf den Gebieten der Gemeinden Olten und Trimbach. 1880 wurde auf dem Areal mit dem Bettenhaus das erste Gebäude erstellt. Es folgten weitere: 1934 die Wäscherei, in den sechziger Jahren die heutigen Hauptgebäude, darunter auch das 14 Stockwerk hohe Personalhaus. Eine grosszügige und weitläufige Parkanlage umschliesst die einzelnen Bauten. In den frühen achtziger Jahren entstanden Studien zur Sanierung und Erweiterung der gesamten Gebäudegruppe. Das Projekt musste aber aus Kosten-

gründen fallengelassen werden. Ein reduziertes Konzept wird nun etappenweise realisiert und bis im Jahr 2007 abgeschlossen. Während der ganzen Bauzeit wird der Spitalbetrieb aufrechterhalten. Die wertvolle Parkanlage wird weitgehend gesont.

#### Das Projekt im Überblick

Das Gesamtprojekt umfasst die Sanierung der bestehenden Gebäude und ihre Erweiterung. Auf den Bau freistehender neuer Anlagen wird verzichtet. Die Alt- und Neubauteile gruppieren sich um eine Erschliessungskernzone, was die Orientierung im weitläufigen Gebäudekomplex erleichtert. Die gegenseitige Verbindung erfolgt über ein verzweigtes und dichtes Gangnetz. Die Kontraste im Areal beschränken sich auf die Gegenüberstellung von 'historischen' und 'modernen' Gebäuden. Das Projekt ist darauf ausgerichtet, die Einheit der Gesamtanlage zu bewahren. Von der heterogenen Bausubstanz des städtebaulichen Umfeldes hebt

#### Hauptdimensionen der Fassadensanierung des Personalhauses

Stahlkonsolen: 2880 m  
Aluminiumprofile: 6000 m  
Glasfläche: 2200 m<sup>2</sup> (50 Tonnen)  
Isolationsfläche: 2400 m<sup>2</sup>  
Schrauben, Nieten: 16 000  
Kleb- und Schlaganker: 3300



Kantonsspital Olten, Fassadensanierung Personalhaus