



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Energie BFE

Ernst **Basler + Partner** AG

Risikoabschätzung zu alternativen Treibstoffen und Antrieben

Möglicher Einfluss auf die Risiken des Strassenverkehrs durch Einsatz neuer Antriebskonzepte

Zusammenfassung

Veränderungen bis 2035	Für das Jahr 2035 werden gemäss Energieperspektiven des BFE verschiedene Veränderungen erwartet: Zunahme der Fahrleistung, geänderter Treibstoff-Mix, abnehmender Energieverbrauch je Fahrzeugkilometer. Dabei stellt sich die Frage, ob diese Entwicklungen einen Einfluss auf die Sicherheit im Verkehr, aber auch die Sicherheit bei Lagerung, Transport und Umschlag in Tankstellen haben.
Risikobetrachtung	Die vorliegende Arbeit geht auf diese Frage ein. Ausgangspunkt ist die zunehmende Verwendung unterschiedlicher Treibstoffe (flüssig, gasförmig) sowie eine breitere Palette von Antriebsformen (Verbrennungsmotor, Hybrid-, Elektroantrieb).
Abgrenzungen	Die Betrachtung geht auf die Bereiche Lagerung, Transport, Umschlag in Tankstellen und Betrieb in Fahrzeugen jeweils gesondert ein. Ausgeschlossen sind die Herstellung von Treibstoffen und Risiken beim Fahrzeugeinsatz, die keinen Zusammenhang mit dem Treibstoff bzw. Antrieb haben.
Gesamtbild	Die Arbeit stützt sich auf die Auswertung von Literatur, Gespräche und Abschätzungen. Dabei wird auf die spezifischen Eigenschaften und Gefahren eingegangen und versucht, ein Gesamtbild unter Berücksichtigung des erwarteten Treibstoffverbrauchs und der Fahrleistungen in der Zukunft zu entwerfen. Die Basis bilden die Energieperspektiven des BFE für das Jahr 2035.
Heutiges Risiko	Bezogen auf das Jahr 2005 wird das kollektive Todesfallrisiko, verursacht durch Treibstoffe, auf ein bis drei Todesopfer pro Jahr geschätzt. Der Wert wird bestimmt durch schwere Verkehrsunfälle beim Fahrzeugeinsatz. Lagerung und Transport tragen nur geringfügig bei. Bezogen auf das gesamte kollektive Todesfallrisiko im Strassenverkehr ist der Anteil des treibstoffbedingten Risikos unter 1%.
Veränderungen bis 2035	Für das Jahr 2035 werden gemäss Energieperspektiven des BFE verschiedene Veränderungen erwartet: Veränderte Fahrleistung und Treibstoff-Mix sowie abnehmender Energieverbrauch je Fahrzeugkilometer. Werden die erwarteten Entwicklungen zugrunde gelegt, so entsteht für die unterschiedlichen Szenarien ein Rückgang des kollektiven Todesfallrisikos.
Unterschiedliche Charakteristik	Auch wenn sich Unterschiede in der Charakteristik des Risikos durch die einzelnen Treibstoffe und Antriebe im Gesamtbild kaum ausdrücken, sind bei näherer Betrachtung Veränderungen erkennbar. Soweit sie beeinflussbar sind, entsteht ein gewisser Handlungsbedarf bei der Bewältigung von Verkehrsunfällen (Einsatzkräfte), der Prüfung spezifischer Ereignisszenarien, beim Umgang mit Einzel- oder Sonderlösungen wie beispielsweise Fahrzeugtuning, bei der Befähigung für Unterhalt- und Reparaturarbeiten, etc.

Risikowahrnehmung Zu beachten ist, dass Risiken nicht nur aus einer rein technische Sicht zu beurteilen sind, sondern ebenso die Risikowahrnehmung eine Rolle spielt. Aus dieser Sicht sind hohe Sicherheitsanstrengungen gerechtfertigt (Image).

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

Erwartete Veränderungen bei Treibstoffen und Antrieben

In den letzten Jahren ist die Diskussion um die Antriebe der Zukunft im Strassenverkehr intensiver geworden. Vor allem Treibstoffe aus biogenen Rohstoffen (z.B. Biodiesel, Bioethanol) und schadstoffarme Antriebe (Brennstoffzelle, Elektro, Hybrid) stehen dabei im Vordergrund. Mittel- bis langfristig wird im Strassenverkehr von erheblichen Veränderungen bei der Verbreitung von bisher eingesetzten und neuen Treibstoffen und Antriebs-technologien ausgegangen.

CO₂-Emissionen und Erdölverknappung als treibende Kräfte

Diese Entwicklung hat vor allem zwei treibende Kräfte:

- Zum einen trägt der Strassenverkehr einen erheblichen Teil zum anthropogenen CO₂-Ausstoss und damit zum Klimawandel bei. Sollen die CO₂-Emissionen deutlich reduziert werden, so wird auch der Strassenverkehr einen Beitrag leisten müssen.
- Zum anderen ist Erdöl, aus dem die zurzeit noch wichtigsten Kraftstoffe Benzin und Diesel raffiniert werden, eine endliche Ressource. Von verschiedener Seite wird davon ausgegangen, dass das Ölfördermaximum (engl. *peak oil*) erreicht ist oder in Kürze erreicht wird. Mit der Zeit wird es immer aufwändiger und damit teurer, die verbleibenden Ressourcen zu fördern. Dies zeigt sich im steigenden Ölpreis. Mittel- bis langfristig dürfte Erdöl und damit Benzin und Diesel für die verbreitete Verwendung als Treibstoff zu teuer werden.

Neue mögliche Gefahren in der Versorgung

Mit der erwarteten Verlagerung von Treibstoffen auf Rohölbasis zu neuen Treibstoffen und Antriebskonzepten werden zum einen Veränderungen in der Versorgungslogistik erwartet. Bei einigen alternativen Treibstoffen werden zudem ganz andere Versorgungssysteme genutzt, wie z.B. Gasleitungen für Erdgas als Treibstoff. Diese Änderungen führen auch zu anderen Gefährdungen und Risiken in der Treibstoff-Versorgung.

Neue mögliche Gefahrenquellen im Strassenverkehr

Mit der Verbreitung neuer Treibstoffe und Antriebskonzepte auf den Strassen werden künftig andere Systemkomponenten eine grosse Verbreitung erfahren, wie z.B. Hochdruck-Gastanks, Batteriesysteme oder Elektromotoren mit hohen Spannungen. Auch diese Änderungen können Verschiebungen der treibstoff- und antriebsbedingten Gefahren und Risiken im Strassenverkehr nach sich ziehen.

Entwicklung der Risikolandschaft in der Schweiz

Diese erwarteten Entwicklungen sind der Auslöser für das Bundesamt für Energie (BFE), sich mit der Frage auseinander zu setzen, welche Verände-

rungen sich bei den Risiken der Treibstoffversorgung und beim Einsatz der neuen Treibstoffe und Antriebe im Strassenverkehr ergeben. Der vorliegende Bericht soll diese Frage angehen und ein Bild einer zukünftigen Risikolandschaft entwerfen.

1.2 Zielsetzung

Mit dem Projekt werden folgende generelle Zielsetzungen verbunden:

- | | |
|--------------------------------|--|
| Schwachstellen und der Risiken | – Beschreibung der Sicherheits-Schwachstellen, Gefährdungen und Risiken von alternativen Treibstoffen in der Versorgung und beim Einsatz der Fahrzeuge im Strassenverkehr. Die Vergleichsbasis bildet dabei der heutige Einsatz von Benzin/Diesel. |
| Darstellen Risikolandschaft | – Darstellen einer zukünftigen Risikolandschaft unter Berücksichtigung der Entwicklungsszenarien der Energieperspektiven 2035 des BFE. Veränderungen gegenüber heute. |
| Handlungsempfehlungen | – Erkennen von Ansatzpunkten für eine Reduktion von Risiken und von allfälligem zusätzlichem Untersuchungsbedarf. |

1.3 Abgrenzungen

- | | |
|------------------------------|--|
| Alternative Treibstoffe | Die Betrachtung fokussiert auf die Gefahren und Risiken alternativer Treibstoffe und Antriebe hauptsächlich im Vergleich zu konventionellen Flüssigtreibstoffen. Betrachtet werden zum einen der Transport und die Zwischenlagerung der Treibstoffe auf dem Weg zum Verbraucher. Zum anderen werden die Risiken beim Fahrzeugeinsatz berücksichtigt. |
| Alternative Fahrzeugkonzepte | Von der Untersuchung ausgeklammert sind andere alternative Fahrzeugkonzepte, z.B. Neuerungen im Karosseriebereich oder bezüglich aktiver Sicherheitsmassnahmen, die unabhängig vom verwendeten Treibstoff oder Antrieb sind (vgl. Abbildung 1). |

Abbildung 1:
Themenkreis der vorliegenden Studie



Neben der Fokussierung auf Treibstoffe und Antriebskonzepte werden für die Studie folgende Systemgrenzen angenommen (vgl. Tabelle 1):

Räumlich	Die Studie fokussiert auf die Änderungen der Risiken für die Bevölkerung in der Schweiz. Daher werden nur diejenigen Prozesse betrachtet, welche im Inland stattfinden. Entsprechend dieser Rahmenbedingung enthält die Studie keine Informationen über die "Risikobilanz" von Treibstoffen im Sinne einer Ökobilanz (Life Cycle Analysis) wie sie durch das BFE [2007a] vorgestellt wurde.
Zeitlich	Die treibstoff- und antriebsbedingten Risiken werden im Hinblick auf die Szenarien der Energieperspektiven 2035 des BFE [2007b] betrachtet. Als Referenzzeitpunkt dient die Situation im Jahre 2005.
Schäden	Bei der Betrachtung der Risiken ist zwischen Personen-, Umwelt- und Sachschäden zu differenzieren. Im Vordergrund stehen bei den betrachteten Risiken die Personenschäden.
Treibstoffversorgung	Um ein einheitliches Vorgehen innerhalb der beschriebenen Systemgrenzen zu gewährleisten, wird bei allen Treibstoffen die Lagerung und der Transport ab Produktionsort (sofern er in der Schweiz liegt) oder ab Grenze der Schweiz betrachtet (bei importierten Treibstoffen).
Fahrzeuge	Um ein ausgewogenes Bild zu erhalten, wird die Analyse anhand der recht homogenen Fahrzeugkategorie Personenwagen durchgeführt. Damit wird die nach Anzahl und Fahrzeugkilometer bedeutendste Kategorie betrachtet. Lastkraftwagen, Motorräder etc. werden nicht separat behandelt. Es kann aber davon ausgegangen werden, dass die Unterschiede in den Risiken der Treibstoffe auch bei diesen Fahrzeugkategorien ähnlich ausgeprägt sind wie bei Personenwagen.
Fahrzeugeinsatz	Beim Fahrzeugeinsatz werden alle treibstoff- oder antriebsbedingten Risiken in die Betrachtung einbezogen. Es werden also sowohl Vorfälle mit als auch ohne Fremdeinwirkung berücksichtigt. Nicht berücksichtigt werden alle Risiken, die nicht durch den Treibstoff oder das Antriebssystem bedingt sind.
Treibstoffe	Betrachtet werden in der Studie die im Jahr 2005 verbreiteten Treibstoffe und diejenigen, für die im Jahr 2035 von einer relevanten Verbreitung ausgegangen werden kann. Treibstoffe, deren verbreiteter Einsatz im Jahr 2035 aus heutiger Sicht wenig realistisch erscheint, werden in den Risikoszenarien nicht berücksichtigt, sie werden aber qualitativ als "Wild Cards" diskutiert. Darunter werden Entwicklungsszenarien verstanden, die eine aus heutiger Sicht geringe Eintretenswahrscheinlichkeit haben, die jedoch erhebliche Veränderungen bedeuten könnten.

Antriebe Als Antriebssysteme werden Verbrennungsmotoren sowie der Elektro- und Brennstoffzellen-Antrieb inkl. möglicher Mischformen (Hybridfahrzeuge) berücksichtigt.

Tabelle 1:
Systemgrenzen

Kriterium	Betrachtetes System
Räumlich	Schweiz
Zeitlich	Zustände 2005 und 2035 (= Zeithorizont Energieperspektiven des BFE)
Schäden	Primär Personenschäden, Sachschäden
Treibstoffversorgung	Lagerung und Transport ab Produktionsort in der Schweiz oder ab Einfuhr (ohne Produktion)
Fahrzeugeinsatz	Ereignisse mit und ohne Fremdeinwirkung bei Personenwagen
Treibstoffe	Benzin/Diesel Alle alternativen Treibstoffe, die heute und/oder 2035 verbreitet sind
Antriebe	Verbrennungsmotoren (Flüssig- und Gaskraftstoffe) Elektro- / Brennstoffzellen-Fahrzeuge

Aktive Sicherheitsmassnahmen und Leichtbau nicht antriebspezifisch

Aktive Sicherheitsmassnahmen zur Unfallvermeidung, z.B. intelligente Fahrerassistenzsysteme, werden nicht betrachtet, da sie nicht antriebspezifisch sind. Nicht Gegenstand der Studie ist ebenfalls die allgemeine Verkehrssicherheit alternativer Fahrzeugkonzepte mit herkömmlichen Antriebskonzepten, wie z.B. Leichtbau-Fahrzeuge.

Gliederung in Bereiche und Prozesse

Aus diesen Systemgrenzen ergeben sich die in Tabelle 2 aufgeführten Bereiche und Prozesse von Veränderungen im Treibstoff- und Antriebsmix (ausserhalb der Systemgrenzen der vorliegenden Studie liegende Bereiche in grau).

Tabelle 2:
Betroffene Bereiche und Prozesse

<p>Produktion/Förderung der Treibstoffe</p> <ul style="list-style-type: none"> – Rohöl-Förderung, Transport und beim Raffinieren – Erdgas-Förderung, Aufbereitung und Transport – Anbau, Ernte, Verarbeitung von Biomasse zu Treibstoff und Transport – Ausweitung der Stromproduktion für den Strassenverkehr
<p>Transport</p> <ul style="list-style-type: none"> – Transport der flüssigen und gasförmigen Treibstoffe vom Produktions- oder Einfuhrort zur Tankstelle
<p>Lagerung</p> <ul style="list-style-type: none"> – (Zwischen-)Lagerung der flüssigen und gasförmigen Treibstoffe
<p>Umschlag an Tankstelle</p> <ul style="list-style-type: none"> – Belieferung der Tankstellen: Umfüllen des Treibstoffes vom Transportbehälter (v.a. Tanklastwagen) in Lagertanks der Tankstelle

Einsatz im Fahrzeug

- Tanken: Befüllen von Fahrzeugen mit Treibstoff an der Tankstelle
- Normalbetrieb: Sicherheit von Treibstoff und Antriebskomponenten (v.a. Tank, Leitungen, Motor) vor Schäden durch Fehlfunktionen.
- Unfall: Risiko durch Freisetzung von Treibstoff, Gefährdung durch treibstoff-spezifische Bauteile (z.B. Gastank) sowie Gefährdung durch die Beschädigung des Antriebssystems (z.B. Akkumulatoren) etc.

1.4 Grundlagen

Die vorliegende Risikoanalyse stützt sich auf diverse Quellen, welche als Grundlage für die Einschätzungen dienen. Es handelt sich dabei um Grundlagen folgender Art:

- Interviews – Interviews: Mit verschiedenen Experten aus den Bereichen Wissenschaft und Technik, Treibstoffversorgung und KFZ-Praxis wurden Interviews geführt.
- Szenarien – Szenarien zum Verbrauch von Treibstoffen im Strassenverkehr und zum Strassenverkehrsaufkommen: Die Studie stützt sich auf bestehende Szenarien verschiedener Quellen vor allem. jedoch auf die Energieperspektiven des BFE (2007).
- Statistiken – Ereignisstatistiken: Diese dienen vor allem, um Häufigkeit und Ausmass der Ereignisse einzuschätzen.
- Risikoanalysen – Bestehende Risikoanalysen: Abgestützte Einzelergebnisse werden in die vorliegende Analyse integriert.
- Normen und Vorschriften – Normen und Vorschriften: Aufgrund der sehr grossen Anzahl werden diese nicht aufgelistet, sondern in Einzelfällen angesprochen, wo dies hilfreich ist.

2 Betrachtete Treibstoffe und Antriebe

Übersicht und
Charakterisierung

Im Folgenden werden die betrachteten Treibstoffe und Antriebe und deren sicherheitsrelevante Eigenschaften in einer Übersicht dargestellt. Sie bilden eine Grundlage und Voraussetzung für die eigentliche Risikobetrachtung in Kapitel 0.

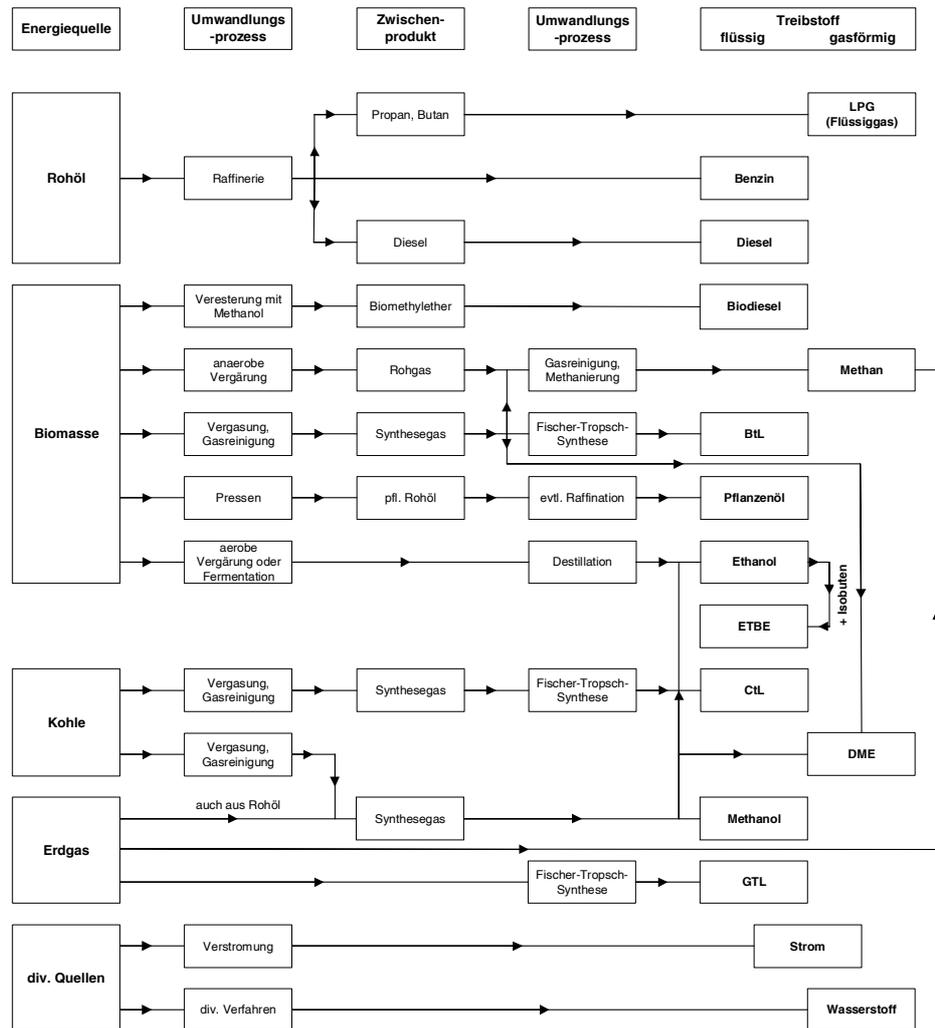
2.1 Treibstoffe

2.1.1 Übersicht

Herstellungspfade

Für die Verwendung in Fahrzeugen kommen flüssige und gasförmige Treibstoffe sowie Strom in Frage. Mögliche Herstellungspfade der Treibstoffe sind in Abbildung 2 dargestellt. Als Rohstoff bzw. Energiequelle dienen Öl, Biomasse, Kohle, Erdgas und andere Quellen. Die v.a. flüssigen, aber auch gasförmigen Treibstoffe werden über diverse Umwandlungsprozesse und Zwischenprodukte produziert.

Abbildung 2
Herstellungspfade der Treibstoffe



Breites Spektrum

Abbildung 2 macht deutlich, wie breit das Spektrum der Treibstoffe ist, wobei die künftige Bedeutung der einzelnen Treibstoffe sehr unterschiedlich sein kann. Vereinfacht lassen sich die Treibstoffe für die Risikobetrachtung wie folgt zusammenfassen:

Tabelle 3:
Treibstoff-Übersicht

Gruppe	Treibstoff
Flüssige Treibstoffe	Benzin Diesel Pflanzenöl Biodiesel Ethanol Methanol ETBE (Ethyl-Tertiär-Butylether) Synthetische Treibstoffe (BTL, GTL, CTL)
Gasförmige Treibstoffe	Methan (Erd- oder Biogas) Flüssiggas (auch LPG oder Autogas) Dimethylether (DME) Wasserstoff
Strom	

Treibstoffe in reiner Form oder in Mischungen

Einzelne Treibstoffe werden in reiner Form oder in Mischungen eingesetzt (z.B. E85). Auch können sie in unterschiedlichen Aggregatzuständen auftreten (z.B. Verflüssigung von Gasen wie Methan oder Wasserstoff).

2.1.2 Beschreibung der Treibstoffe

Die Treibstoffe lassen sich wie folgt kurz charakterisieren:

Benzin Benzin wird durch Erdölraffination hergestellt und als Treibstoff in Ottomotoren eingesetzt. Aufgrund der Endlichkeit der Ressource ist mit zunehmender Verknappung und mit einer Verteuerung des Benzins zu rechnen. Derzeit ist es der am weitesten verbreitete Treibstoff.

Diesel Diesel wird ebenfalls aus Erdöl produziert, hat jedoch eine andere chemische Zusammensetzung. Die Aussage zur Verknappung gilt gleichermassen wie beim Benzin. Es ist in Mitteleuropa der zweithäufigste Treibstoff.

Pflanzenöl Pflanzenöle werden durch das Pressen von Pflanzen, bzw. deren Samen gewonnen (z.B. Raps). Der Treibstoff wird in entsprechend angepassten Dieselmotoren eingesetzt. Da nur die ölhaltigen Pflanzenteile für die Produktion genutzt werden können, ist die Produktion deutlich weniger effizient als bei Biotreibstoffen der 2. und 3. Generation. Es ist daher nicht mit einer grösseren Verbreitung zu rechnen.

Biodiesel Biodiesel (Fettsäuremethylester, FAME) wird durch Veresterung von Pflanzenölen erzeugt. Biodiesel wird erdölbasiertem Diesel beigemischt (z.B. B5, B10) oder in reiner Form als Treibstoff für Dieselmotoren verwendet (B100). Bei grösserer Beimischung sind je nach Motor Anpassungen nötig. Derzeit ist Biodiesel auf dem Schweizer Treibstoffmarkt ein Nischenprodukt. Langfristig dürfte Biodiesel durch effizientere Biotreibstoffe der 2. Generation abgelöst werden.

(Bio-)Ethanol Ethanol wird meist aus Biomasse hergestellt (sog. Bioethanol) und kann Benzin beigemischt werden (z.B. E5) oder den Hauptbestandteil des Treibstoffes bilden (z.B. E85, E100).

Methanol Methanol wird aus Erdgas oder Kohle hergestellt. Es hat eine hohe Klopfestigkeit und daher kraftstoffverbessernde Eigenschaften und wird Benzin oder Diesel beigemischt (sog. Additiv).

ETBE (Ethyl-Tertiär-Butylether)

ETBE (Ethyl-Tertiär-Butylether) wird aus Ethanol und Isobutylene hergestellt. Es wird herkömmlichem Benzin beigemischt. Ethanol und ETBE haben beide den Vorteil einer hohen Oktanzahl. ETBE hat in den letzten Jahren mehr und mehr MTBE (Methyl-Tertiär-Butylether) als Benzin-Additiv verdrängt, das vergleichbare Stoffeigenschaften hat, jedoch aus Erdgas und Isobutylene hergestellt wird.

Synthetische Treibstoffe: BTL, GTL, CTL	Synthetische Treibstoffe werden aus den Synthesegasen von Biomasse (biomass to liquids, BTL), Gas (gas to liquid, GTL) oder Kohle (coal to liquid, CTL) hergestellt. Synthetische Treibstoffe erfordern keine oder nur geringfügige Änderungen am Verbrennungsmotor. Derzeit laufen Entwicklungen, um synthetische Treibstoffe in Grossanlagen zu produzieren.
Methan (Erd- oder Biogas)	Methan ist der Hauptbestandteil des als Treibstoff eingesetzten Erdgas und der aus Biomasse über Vergärung (Biogas) oder Vergasung und Methanierung (synthetic natural gas, SNG) produzierten Gase. Aufgrund der geringen Verunreinigungen verbrennt es verhältnismässig sauber. Es wird in komprimierter oder verflüssigter Form als CNG Compressed Natural Gas (komprimiertes Erdgas) oder LNG Liquefied Natural Gas (Flüssigerdgas) verwendet. Derzeit nimmt die Verbreitung von Erdgas als Treibstoff zu.
Flüssiggas (auch LPG oder Autogas)	Flüssiggas besteht meist überwiegend aus Propan und Butan und ist ein Nebenprodukt der Erdölraffination. Unter Druck verflüssigt wird das Gas in Verbrennungsmotoren eingesetzt. Dazu bedarf es einer Umrüstung des Tank- und Treibstoffleitungssystems. Während Flüssiggas als Treibstoff z.B. in den Niederlanden und Italien bereits lange eine bedeutende Verbreitung erfahren hat, wird für die Schweiz nicht von einer grösseren Verbreitung ausgegangen.
Dimethylether (DME)	Das gasförmige DME wird üblicherweise direkt aus Synthesegas hergestellt und enthält noch geringe Mengen Methanol und Wasser. Als Quelle für das Synthesegas sind wie bei den synthetischen Treibstoffen BTL, GTL und CTL insbesondere Biomasse, Erdgas und Kohle geeignet. Dimethylether hat ähnliche Stoffeigenschaften wie Flüssiggas und gute Brenneigenschaften. Es kann nach Umrüstung mit neuem Tank und Treibstoffleitungssystem in Dieselmotoren eingesetzt werden. Derzeit ist DME als Treibstoff noch kaum verbreitet.
Wasserstoff	Wasserstoff kann elektrolytisch aus Wasser, sowie thermochemisch oder durch chemische Reformierung aus Biomasse oder fossilen Quellen produziert werden. Es verbrennt schadstofffrei. Die CO ₂ -Bilanz ist davon abhängig, wie die zur Produktion des Wasserstoffs benötigte Energie gewonnen wird. Wasserstoff kann in Brennstoffzellen oder Verbrennungsmotoren eingesetzt werden. Die Herausforderungen bestehen bei der emissionsarmen Produktion, der Distribution und der Speicherung des Wasserstoffes. Dennoch wird v.a. seitens der Automobilindustrie zukünftig eine sehr weite Verbreitung von Wasserstoff als Treibstoff für möglich gehalten und gefördert.

2.1.3 Sicherheitsrelevante Eigenschaften

Eigenschaften Für die Sicherheit der Treibstoffe sind verschiedene Eigenschaften von Bedeutung, in denen sich die Treibstoffe erheblich unterscheiden können:

- Toxische, narkotisierende, ätzende und Allergien auslösende Eigenschaften
 - Physikalische Eigenschaften wie Dampfdruck, Flammpunkt, Zündzeitpunkt, Explosionsgrenzen, etc.
 - Wassergefährdende Eigenschaften
- Generelle Anforderungen In der Summe der Eigenschaften sollen die Treibstoffe eine gefahrlose Handhabung auch durch Laien erlauben, bei allen Umgebungsbedingungen transportierbar und lagerfähig sein, eine geringe Neigung zur Bildung brand- und explosionsfähiger Gemische aufweisen und beispielsweise keine Einschränkungen beim Abstellen der Fahrzeuge in Garagen mit sich bringen.

Flüssige Treibstoffe

- Dampfdruck Der Dampfdruck bezeichnet den Umgebungsdruck, unterhalb dessen eine Flüssigkeit beginnt, bei konstanter Temperatur in den gasförmigen Zustand überzugehen. Der Umgebungsdruck im Freien liegt bei etwa 1 bar.
- Flammpunkt Beim Flammpunkt handelt es sich um die Temperatur, ab der sich genug brennbare Gase bilden, damit eine Verbrennung stattfinden kann. Zwar erlischt die Verbrennung über der Flüssigkeit ohne Zündquelle wieder – im Gegensatz zum Brennpunkt, der meist 30-40 °C höher liegt –, es kann jedoch zur Entzündung von explosionsfähigen Gas/Luft-Gemischen kommen. Bei Mineralölprodukten ist zu beachten, dass der Flammpunkt schon durch Zumischen geringer Mengen leicht siedender Flüssigkeiten stark herabgesetzt werden kann.
- Zündpunkt Der Zündpunkt bezeichnet die Temperatur, bei der sich ein zündfähiges Gasgemisch auch ohne Funken entzündet.
- Explosionsgrenzen Explosionsgrenzen geben den Bereich der Gas/Luft-Gemische an, innerhalb derer eine Explosion des Gemisches möglich ist. Unterhalb der unteren Explosionsgrenze ist ein Gemisch zu "mager", oberhalb der oberen Explosionsgrenze ist es zu "fett".
- Unterteilung in Alkohole, Benzine, Fette/Öle Von Bedeutung für Sicherheitsbetrachtungen ist darüber hinaus die Eigenschaft der Flüssigkeiten gegenüber Wasser. Danach lassen sich die Flüssigtreibstoffe in folgende Gruppen unterteilen:
- Alkohole: Mit Wasser mischbar und durch heraufsetzen des Flammpunktes löschar
 - Benzine: Nicht mit Wasser mischbar und dadurch auch nicht mit Wasser löschar
 - Fette/Öle: Nicht mit Wasser misch- und löschar. Besondere Gefahr der Fettexplosionen, die beim Löschen von Bränden siedender Öle mit

Wasser auftreten können (spontane Verdampfung und grosse Volumenvergrößerung durch Kontakt mit Wasser mit Feuerball als Folge).

Wassergefährdungsklasse

In Bezug auf Umweltschäden ist zudem die Wassergefährdungsklasse von Bedeutung. Die Wassergefährdungsklasse gibt das Potenzial eines Stoffes an, Wasser zu verunreinigen. Es werden drei Klassen unterschieden¹⁾:

- WGK 1 = schwach wassergefährdend
- WGK 2 = wassergefährdend
- WGK 3 = stark wassergefährdend.

In Tabelle 4 sind die wesentlichen sicherheitsrelevanten Eigenschaften der flüssigen Treibstoffe zusammengestellt.

Tabelle 4:
Sicherheitsrelevante
Eigenschaften der flüssigen
Treibstoffe
(Quelle: Hommel 2004)

Flüssigkeit	Flammpunkt	Dampfdruck in mbar bei 20 °C	Zündtemperatur	Zündfähiges Gemisch, Vol. %	Siedepunkt	Wassergefährdungsklasse	Bemerkung
Benzin	<-20 °C	365-90	220 °C	0.6-8.0	30-215 °C	3	Bildet explosionsfähige Gemische, die schwerer als Luft sind
Diesel	>55-100 °C ²⁾	n.b.	220 °C	0.6-6.5	150-390 °C	2	
Pflanzenöl (Rapsöl)	230 °C	n.b.	ca. 300 °C	n.b.	n.b.	-	
Biodiesel	180 °C	n.b.	ca. 250 °C	n.b.	ca. 300°C	-	
Ethanol (Konzentration >70%)	17°C (bei 96%)	59	425 °C	3.5-15	78 °C	1	
Methanol	11 °C c.c.	129	455 °C	5.5-36.5	64.7 °C	1	s. Benzin
ETBE	-1 °C c.c.	58	184 °C	n.b.	92 °C	n.b.	
BTL, GTL, CTL	GTL: 59°C (Beispiel)	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	

Spezielle Aspekte

Besondere Gefährdungen gehen von flüssigen Treibstoffen in zweierlei Hinsicht aus:

- 1) Diese Klassen entsprechen der Verwaltungsvorschrift wassergefährdende Stoffe in Deutschland. In der Schweiz wurden gemäss Verordnung über den Schutz der Gewässer vor wassergefährdenden Flüssigkeiten (VWF) zwei Klassen unterschieden: Klasse 1, wenn sie in kleinen Mengen Wasser nachteilig verändern können, Klasse 2, wenn sie in grossen Mengen Wasser nachteilig verändern können. Diese Verordnung wurde 2007 ersatzlos aufgehoben. Eine Einteilung in Klassen erfolgt in den meisten Kantonen nun nach den deutschen Vorschriften.
- 2) Im Winter enthält Dieselöl häufig einen Zusatz von Benzin, wodurch der Flammpunkt erheblich herabgesetzt wird.

- Bildung zündfähiger Dämpfe in geschlossenen Räumen oder in der Kanalisation: Bei Benzin, Ethanol, Methanol und ETBE können sich bei normalen Umgebungstemperaturen brennbare Gase bilden, die bei Zündung zu einem Gaswolkenbrand führen. Entstehen die Dämpfe in geschlossenen Räumen oder z.B. in der Kanalisation, so erfolgt diese Verbrennung explosionsartig mit i. A. höheren Druckwirkungen.
- Unterfeuerung von Treibstofftanks: Bei einer Unterfeuerung z.B. von Tankwagen infolge eines Unfalles kann der Tank soweit erhitzt werden, dass der Treibstoff zu sieden beginnt. Dies hat einen Druckaufbau zur Folge, der im ungünstigsten Fall zum Bersten des Tanks führen kann. Der dabei spontan freigesetzte Treibstoff-Dampf brennt in einem grossen Feuerball unter enormer Hitzeentwicklung sehr schnell ab (sog. BLEVE, engl. Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion).

Gase

Gase lassen sich durch folgende sicherheitsrelevanten Eigenschaften charakterisieren:

Dichte / Dichteverhältnis zu Luft	Die Dichte ist eine wichtige sicherheitsrelevante Eigenschaft von Gasen: Entscheidend ist vor allem, ob das Gas leichter oder schwerer als die Umgebungsluft ist (Dichteverhältnis zur Luft), sich also nach oben verflüchtigt oder am Boden sammelt.
Explosionsgrenzen	vgl. Flüssigkeiten
Kritische Temperatur	Die kritische Temperatur bezeichnet den Punkt, unterhalb dessen ein Gas durch Druck verflüssigt werden kann. Gase werden nach der kritischen Temperatur wie folgt unterteilt: <ul style="list-style-type: none"> – Permanente Gase: Gase mit kritischer Temperatur, die deutlich unter der herkömmlichen Umgebungstemperatur liegt (kleiner als -10 °C) und die deshalb bei Umgebungstemperatur nicht verflüssigt werden können (z.B. Methan, Wasserstoff) – Verflüssigte Gase: Gase mit kritischer Temperatur zwischen -10 °C und 70 °C, die unter Druck in flüssigem Zustand gelagert werden (z.B. Flüssiggas) – Unter Druck gelöste Gase: Gase, welche unter Druck in Flüssigkeiten gelöst sind.
Kritischer Druck	Der kritische Druck bezeichnet den Druck, ab dem ein Gas durch genügend Abkühlung verflüssigt werden kann.

In Tabelle 5 sind die genannten sicherheitsrelevanten Daten zu den betrachteten Treibstoffen aufgeführt.

Tabelle 5
Sicherheitsrelevante
Eigenschaften der
gasförmigen Treibstoffe
(Quelle: Hommel 2005)

Gase	Dampfdichtever- hältnis, Luft=1	Zündfähiges Ge- misch, Vol. %	Siedepunkt	Kritische Tempe- ratur	Kritischer Druck
Methan ³⁾	0.55	5.0 – 15.8	-161 °C	-82.1 °C	46 bar
LPG Propan	1.56	2 – 11.7	ca. -48 - -1°C	ca. 96.8 °C	42 bar
LPG Butan	ca. 2.02	1.5 – 8.5	ca. -12 - -1 °C	ca. 152 °C	38 bar
Wasserstoff	0.07	4 – 75.6	-253 °C	-240,2 °C	13 bar
DME	1.63	2.7 - 32	-24.8 °C	235 °C	53.7 bar

Besondere Gefährdung:
Freisetzung in geschlossenen
Räumen

Bei den gasförmigen Treibstoffen besteht ein bedeutendes Schadenpotenzial, wenn bei einer Freisetzung grössere Gas-Luft-Gemische in mehr oder weniger geschlossenen Räumen entstehen und zünden können. Damit sind geschlossene Garagen und allenfalls Tunnels angesprochen. Die Gefährdung hängt mehr oder weniger stark vom Dampfdichteverhältnis zur Luft ab. Erdgas ist leichter als Luft und verflüchtigt sich daher nach oben, was dazu führt, dass das Gas bei normaler Lüftung sich rasch verflüchtigt. Flüssiggas ist schwerer als Luft und kann sich eher in Bodennähe oder beispielsweise in der Kanalisation sammeln.

2.2 Antriebskonzepte

2.2.1 Übersicht

Spektrum ist erfasst

Mit den oben genannten Treibstoffen bzw. Strom werden alle derzeit und nach heutigem Kenntnisstand im Jahr 2035 voraussichtlich verbreiteten Antriebskonzepte abgedeckt.

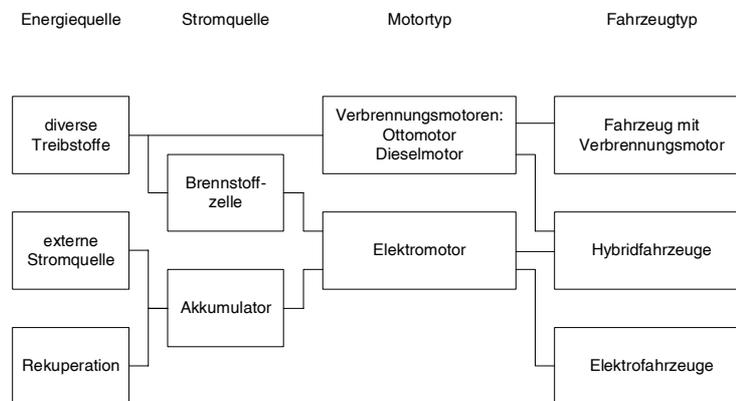
Fahrzeuge, Antriebssysteme und
Energiequellen

Die unterschiedlichen Kombinationen von Energie- oder Stromquellen mit Motortypen und deren Einsatz im Fahrzeug sind in Abbildung 3 dargestellt. Bei Hybridfahrzeugen sind die Elemente Verbrennungs- und Elektromotor kombiniert (unterschiedlicher Grad der Hybridisierung möglich). Als Energieträger können für Verbrennungsmotoren und Brennstoffzellen diverse flüssige oder gasförmige Treibstoffe eingesetzt werden. Elektromotoren werden mit dem Strom der Brennstoffzellen oder aus Akkumulatoren be-

3) Daten beziehen sich auf "Erdgase, verdichtet, mit hohem Methangehalt" (Merkblatt 399c in Hommel 2004)

trieben. Die Akkumulatoren können mit externen Stromquellen oder über Bremskraftrückgewinnung (Rekuperation) aufgeladen werden.

Abbildung 3:
Unterschiedliche
Antriebssysteme



2.2.2 Sicherheitsrelevante Eigenschaften

Gefährdungspotenzial spezieller
Systemkomponenten

Abgesehen von den Eigenschaften der eingesetzten Treibstoffe können einzelne Elemente der Antriebssysteme die Sicherheit des Fahrzeugs beeinflussen. Dabei kann eine Gefährdung grundsätzlich vom Element selbst ausgehen oder durch eine äussere Einwirkung erst entstehen. Beispiele solcher Elemente sind:

- Eigenschaften der Behälter für flüssige oder gasförmige Treibstoffe (Volumen, Gewicht, Druck).
- Anordnung von Drucktanks (mechanische Gefährdung von Insassen bei Unfällen)
- Elektroantrieb: hohe Spannungen im Akkumulator, Leitungen, Motor
- Akkumulator: mögliche Überhitzung mit Brand/Explosion, giftige Stoffe

Die risikorelevanten Details dieser Systemkomponenten werden in Kapitel 0 näher erläutert und sind in den Faktenblättern in Anhang A2 enthalten.

3 Verbreitung der Treibstoffe und Antriebe

Fahrzeugbestand nach Antrieben
und Treibstoffverbrauch für die
summarische Betrachtung

Dieses Kapitel zeigt die heutige sowie die für die einzelnen Szenarien der Energieperspektiven [BFE 2007b] erwartete Verbreitung der Treibstoffe und Antriebe auf. Damit liefert das Kapitel das Mengengerüst für die summarische Betrachtung der Risiken für die Jahre 2005 und 2035 in Kapitel 5.

Fahrleistung und
Treibstoff-/Energieverbrauch

Um einen Vergleich zu ermöglichen werden die abgeschätzten Risiken auf die gefahrene Strecke bzw. Fahrleistung bezogen. Dafür müssen die Fahrleistungen in den Jahren 2005 und 2035 (unterschiedliche Szenarien) bekannt sein. Ebenso muss der Treibstoff-/Energieverbrauch des Verkehrs für die beiden Zeithorizonte bekannt sein.

3.1 Situation 2005

Bestand PW 2005

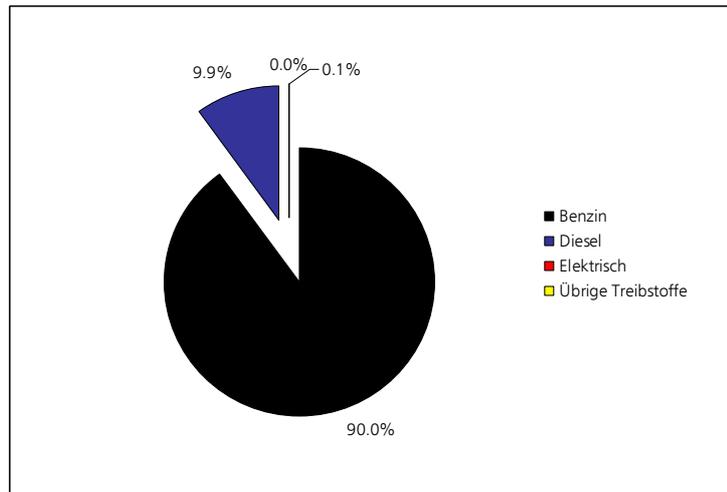
Im Jahr 2005 betrug der Bestand an Personenwagen (PW) von Personen mit Wohnsitz in der Schweiz 3'861'442 PW [BFS 2008].

Verteilung Antriebskonzepte
2005

Die Verteilung der PW auf die verschiedenen Antriebe ist in Abbildung 4 dargestellt. 90% der Fahrzeuge sind mit Benzin-Ottomotoren ausgerüstet, während rund 10% mit Dieselmotoren fahren⁴⁾. Andere Antriebe sind praktisch zu vernachlässigen.

4) Ein deutlich anderes Bild ergibt sich bei Transportfahrzeugen und Landwirtschaftsfahrzeugen, bei denen jeweils der klar überwiegende Anteil mit Dieselmotoren ausgerüstet ist.

Abbildung 4
Fahrzeugbestand nach
Treibstoffen [BFS 2008]



Fahrleistung PW 2005

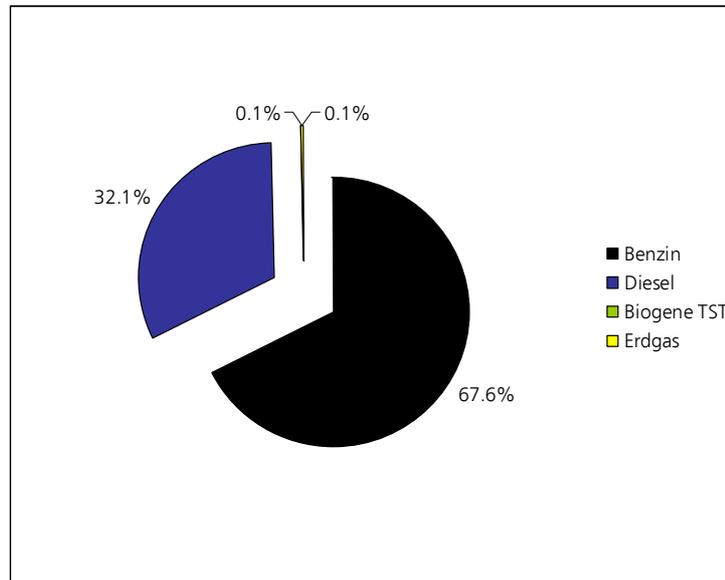
Die Fahrleistung des Personenwagenverkehrs betrug im Jahr 2005 53'689 Mio. PW-km [BFE/Infras 2007].

Treibstoffverbrauch 2005

Der gesamte Treibstoffverbrauch über alle Fahrzeuge in der Schweiz betrug 2005 insgesamt umgerechnet ca. 233 Petajoule (PJ). Die Aufteilung nach den verschiedenen Treibstoffen ist in Abbildung 5 dargestellt. Für PW allein sind entsprechende Daten nicht verfügbar. Der – verglichen mit den PW-Anteilen – hohe Anteil Diesel beruht auf der grossen Verbreitung von Dieselfahrzeugen bei Personentransportfahrzeugen, Sachtransportfahrzeugen⁵⁾ und Landwirtschaftsfahrzeugen [vgl. BFS 2008].

5) Gemäss Bundesamt für Statistik (BFS) sind dies Motorfahrzeuge, die hauptsächlich zum Gütertransport eingesetzt werden.

Abbildung 5
Anteile der einzelnen Treibstoffe
am Gesamtverbrauch 2005
[BFS 2008]



3.2 Situation 2035

3.2.1 Fahrzeugbestand und Fahrleistung

Entwicklung Bestand PW

Der Bestand an PW wird sich bis ins Jahr 2035 je nach zugrunde gelegtem Szenario der Energieperspektiven [BFE 2007b] unterschiedlich entwickeln. In den Szenarien I, II und III wird im Jahr 2035 von einem Bestand von 4'614'000 PW ausgegangen. Im Szenario Ib (mit CO₂-Abgabe) wird mit einem etwas geringeren Bestand von 4'466'000 PW und im Szenario IV von mit dem heutigen Bestand vergleichbaren Zahlen ausgegangen (3'921'000 PW) [BFS/Infras 2007].

Entwicklung Fahrleistung PW

Die erwartete Fahrleistung hängt ebenfalls vom Szenario ab: In den Szenarien I, II und III wird für 2035 von einer Fahrleistung von 63'091 Mio. Fz-km ausgegangen. Etwas weniger ist es bei Szenario Ib mit 61'065 Mio. Fz-km und vergleichbar mit den heutigen Zahlen bei Szenario IV (53'618 Mio. Fz-km).

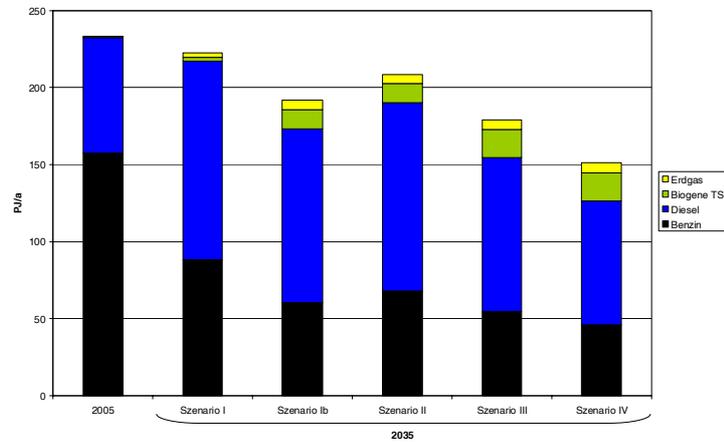
3.2.2 Energieverbrauch nach Treibstoffen

Entwicklung Energieverbrauch
nach Treibstoffgruppen

Die voraussichtliche Entwicklung des Energieverbrauches des gesamten Verkehrs ist in Abbildung 6 nach Treibstoffgruppen dargestellt. Nach diesen Szenarien nimmt vor allem der Diesel-Anteil deutlich zu. Ebenfalls nimmt die Verbreitung von biogenen Treibstoffen zu; sie bleiben jedoch mit max. 12% im Szenario IV hinter Diesel und Benzin zurück. Auch Erdgas

erlangt gemäss diesen Szenarien eine gewisse Verbreitung, etwa in Höhe der Hälfte der biogenen Treibstoffe.

Abbildung 6
Entwicklung Energieverbrauch nach Treibstoffen



Entwicklung der einzelnen Treibstoffe

Für die Risikoanalyse wird eine weitere Unterteilung der Treibstoffgruppen vorgenommen, da die Treibstoffe z.T. unterschiedliche Gefahreneigenschaften aufweisen (vgl. Tabelle 4 und Tabelle 5). Dazu wurden die Anteile von Benzin, Diesel und Erdgas der Energieperspektiven weitgehend übernommen.

Verschiedene weitere Quellen

Zur Herleitung der voraussichtlichen Anteile der in den Energieperspektiven nicht explizit berücksichtigten Treibstoffe im Jahr 2035 wurde auf folgende Autoren und Institutionen zurückgegriffen: BBI 2006, BFE/Infras 2007, CONCAWE/EC/EUCAR 2007, EC 2006, EnergieSchweiz 2007, IEA 2007, SATW 2007, Schulz 2007, scnat/SATW 2007. Die Aussagen differieren z.T. deutlich.

Auf Grundlage der meist qualitativen Beschreibungen wurde eine quantitative Verteilung der alternativen Treibstoffe gemäss Tabelle 6 angenommen.

Tabelle 6
Angenommene Verbreitung der Treibstoffe im Jahr 2035

Konventionelle Treibstoffe	Anteil an Treibstoffmix 2035 (Annahme)	
Benzin	38.0%	
Diesel	43.0%	
Alternative Flüssigtreibstoffe	Anteil an alternat. Tr.	Anteil gesamt
Pflanzenöl	0.0%	0.0%
Biodiesel	0.0%	0.0%
Ethanol	15.0%	2.9%
Methanol	5.0%	1.0%
ETBE (Ethyl-Tertiär-Butylether)	15.0%	2.9%
Synthetische Treibstoffe (BTL, GTL, CTL)	25.0%	4.7%

Alternative gasförmige Treibstoffe	Anteil an altern. Tr.	Anteil gesamt
Methan (Erd- oder Biogas)	35.0%	6.7%
Flüssiggas (auch LPG oder Autogas)	0.0%	0.0%
Wasserstoff	0.0%	0.0%
Dimethylether (DME)	5.0%	1.0%

Erwarteter Verbrauch

Der erwartete Verbrauch der einzelnen Treibstoffe bzw. Treibstoffgruppen in PJ (Petajoule) ist in Abbildung 7 dargestellt. Die Verteilung auf die einzelnen Treibstoffe richtet sich bei Benzin, Diesel, biogenen Treibstoffen und Erdgas (gelber Bereich) nach BFE/Infras [2007]. Die Verteilung auf die einzelnen alternativen Treibstoffen (blauer Bereich) wurden beruhend auf der in Tabelle 6 genannten voraussichtlichen Entwicklung geschätzt (keine detaillierten quantitativen Prognosen über die Entwicklung vorliegend).

Abbildung 7
Angenommener Verbrauch der
einzelnen Treibstoffe im Jahr
2035

Kraftstoffe	2005				2035																	
	Szenario I		Szenario Ib		Szenario II		Szenario III		Szenario IV		Szenario I		Szenario Ib		Szenario II		Szenario III		Szenario IV			
	Verbrauch PJ	Anteil	Verbrauch PJ	Anteil an alternat. TST	Anteil, z.T. geschätzt	Verbrauch PJ	Anteil, z.T. geschätzt															
Konventionelle																						
Benzin	157.50	67.6%	88.40		39.7%	60.70	31.7%	68.10	32.6%	54.90	30.6%	46.00	30.4%	80.60	53.3%	18.20	10.2%	6.50	3.6%	6.50	4.3%	
Diesel	74.90	32.1%	128.80		57.9%	112.70	58.8%	122.20	58.6%	99.60	55.6%	80.60	53.3%	18.20	10.2%	6.50	3.6%	6.50	3.6%	6.50	4.3%	
Biogene TST	0.34	0.1%	2.20		1.0%	12.40	6.5%	12.40	5.9%	18.20	10.2%	18.20	10.2%	6.50	3.6%	6.50	3.6%	6.50	3.6%	6.50	4.3%	
Erdgas	0.28	0.1%	3.10		1.4%	5.90	3.1%	5.90	2.8%	6.50	3.6%	6.50	4.3%	6.50	4.3%	6.50	3.6%	6.50	3.6%	6.50	4.3%	
Alternative																						
Pflanzenöl	0.00	0.00%	0.00	0%	0.00%	0.00	0.0%	0.00	0.0%	0.00	0.0%	0.00	0.0%	0.00	0.0%	0.00	0.0%	0.00	0.0%	0.00	0.0%	
Biodiesel	0.16	0.07%	0.00	0%	0.00%	0.00	0.0%	0.00	0.0%	0.00	0.0%	0.00	0.0%	0.00	0.0%	0.00	0.0%	0.00	0.0%	0.00	0.0%	
Ethanol	0.02	0.01%	1.60	15%	0.36%	2.75	1.4%	2.75	1.3%	3.71	2.1%	3.71	2.4%	3.71	2.4%	3.71	2.1%	3.71	2.1%	3.71	2.4%	
Flüssiggas (Autogas/LPG)	0.03	0.01%	0.00	0%	0.00%	0.00	0.0%	0.00	0.0%	0.00	0.0%	0.00	0.0%	0.00	0.0%	0.00	0.0%	0.00	0.0%	0.00	0.0%	
CTL, GTL, BTL	0.00	0.00%	1.39	25%	0.60%	4.58	2.4%	4.58	2.2%	6.18	3.4%	6.18	4.1%	6.18	4.1%	6.18	3.4%	6.18	3.4%	6.18	4.1%	
Methan (Biogas, Erdgas, SNG)	0.45	0.19%	1.94	35%	0.83%	6.41	3.3%	6.41	3.1%	8.65	4.8%	8.65	5.7%	8.65	5.7%	8.65	4.8%	8.65	4.8%	8.65	5.7%	
Methanol	0.00	0.00%	0.28	5%	0.12%	0.92	0.5%	0.92	0.4%	1.24	0.7%	1.24	0.8%	1.24	0.8%	1.24	0.7%	1.24	0.7%	1.24	0.8%	
DME (Dimethylether)	0.00	0.00%	0.28	5%	0.12%	0.92	0.5%	0.92	0.4%	1.24	0.7%	1.24	0.8%	1.24	0.8%	1.24	0.7%	1.24	0.7%	1.24	0.8%	
ETBE (Ethyl-Tertiär-Butylether)	0.00	0.00%	0.83	15%	0.36%	2.75	1.4%	2.75	1.3%	3.71	2.1%	3.71	2.4%	3.71	2.4%	3.71	2.1%	3.71	2.1%	3.71	2.4%	
Wasserstoff	0.00	0.00%	0.00	0%	0.00%	0.00	0.0%	0.00	0.0%	0.00	0.0%	0.00	0.0%	0.00	0.0%	0.00	0.0%	0.00	0.0%	0.00	0.0%	
Strom	0.00	0.00%	0.00	0%	0.00%	0.00	0.0%	0.00	0.0%	0.00	0.0%	0.00	0.0%	0.00	0.0%	0.00	0.0%	0.00	0.0%	0.00	0.0%	
Summe	233.05	100.0%	223.52	0%	100.0%	191.70	100.0%	208.60	100.0%	179.20	100.0%	151.30	100.0%	179.20	100.0%	151.30	100.0%	151.30	100.0%	151.30	100.0%	

3.2.3 Verbreitung der Antriebskonzepte

Erwartete Entwicklungen bei den Antriebskonzepten Die Abschätzung der Verbreitung der Antriebskonzepte im Jahr 2035 erfolgt ausgehend von heute bereits bekannten Rahmenbedingungen. Im Folgenden sind die wichtigsten Eigenschaften und erwarteten Entwicklungen für die unterschiedlichen Antriebskonzepte skizziert, die auf die Verbreitung im Jahr 2035 schliessen lassen.

Herkömmlicher Verbrennungsmotor

Grosse Verbreitung von Verbrennungsmotoren Verbrennungsmotoren werden auch im Jahr 2035 voraussichtlich noch mit Abstand die grösste Verbreitung aufweisen, da mit ihnen fast alle der zukunftssträchtigen Treibstoffe eingesetzt werden können und sie sehr ausgereift sind.

Verbindung Otto / Dieselmotor Zudem ist das Entwicklungspotential von Otto- und Dieselmotoren noch nicht ausgeschöpft. Auch ist die Verbindung beider Prinzipien möglich (Diesotto-Motor, Combined Combustion System), womit der geringe Verbrauch des Dieselmotors mit der saubereren Verbrennung des Ottomotors kombiniert würde.

Hybridisierung Schliesslich wird der Verbrennungsmotor in unterschiedlichen Kombinationen mit dem Elektromotor Anwendung finden (siehe Hybridisierung).

Hybridisierung

Elemente Unter der Hybridisierung wird im Folgenden eine Antriebskombination von im Allgemeinen einem Verbrennungsmotor und einem oder mehreren Elektromotoren verstanden. Dabei sind Varianten beim Verbrennungsmotor (Benzin, Diesel, Erdgas) und bei den Hybrid-Funktionalitäten sowie Mischformen möglich.

Varianten der Hybridisierung Bei den Hybrid-Funktionalitäten sind vereinfachend der Mild- und der Voll-Hybrid zu unterscheiden:

- Mild-Hybrid: Der Elektromotor unterstützt den Verbrennungsmotor in verschiedenen Funktionen. Das Fahrzeug kann aber nicht elektrisch fahren. Das Spannungsniveau und die Leistung der Elektromotoren sind geringer als bei den Voll-Hybriden.
- Voll-Hybrid: Das Fahrzeug kann alternativ mit dem Verbrennungs- oder Elektromotor angetrieben fahren.

Plug-In-Hybrid Noch einen Schritt weiter geht der Plug-In-Hybrid, bei dem die Batterien nicht nur durch Rekuperation, sondern auch am Stromnetz geladen werden können. Die Reichweite im reinen Elektrobetrieb ist im Allgemeinen auch grösser als bei einem Voll-Hybrid. Der Verbrennungsmotor dient der Vergrösserung der Reichweite.

Alle Formen treten auf	Es ist davon auszugehen, dass alle beschriebenen Hybridformen in Zukunft auftreten und voraussichtlich eine nennenswerte Verbreitung erfahren werden.
Breite Erfahrung vorhanden	Im kommerziellen Betrieb besteht seit rund 10 Jahren Erfahrung mit insgesamt über 1 Mio. verkauften Benzin-Elektro-Hybridfahrzeugen (Mild- und Voll-Hybride). Es handelt sich um eine ausgereifte, etablierte Technik. Bei Dieselfahrzeugen hat sich die Hybridtechnologie bisher nicht durchgesetzt, da der Effizienzgewinn bei Dieselantrieb aufgrund des bereits geringeren Verbrauches weniger ins Gewicht fällt und die Kosten des Dieselmotors nochmals höher sind. Mit Erd-/Biogas-Hybridfahrzeugen liegen bisher nur in der Entwicklung Erfahrungen vor.
Energieperspektiven: keine expliziten Angaben	Die zunehmende Bedeutung ergänzender Elektroantriebe wird in den Energieperspektiven bei den Annahmen über den zukünftigen Fahrzeugverbrauch nicht explizit quantifiziert, da die Energieperspektiven den Strassenverkehr nach Treibstoffverbrauch gliedern, nicht nach Antrieben.
Annahme: 50% Hybridfahrzeuge im Jahr 2035	Aus Effizienzgründen kann von einer zunehmenden Hybridisierung bei PW ausgegangen werden. Die voraussichtliche Verbreitung von Hybridantrieben in der Schweiz wurde von Schulz [2007] modelliert. In der vorliegenden Betrachtung wird vereinfachend die Annahme getroffen, dass im Jahr 2035 bei allen Antriebskonzepten 50% Hybridfahrzeuge vertreten sind.

Elektromotoren

Voraussichtlich v.a. in Hybriden	Die Verbreitung von reinen Elektrofahrzeugen ist derzeit marginal. Dies soll sich nach den Absichten grosser Automobilhersteller jedoch in Zukunft ändern. Allerdings gehen Meinungen und Prognosen über den Anteil rein elektrisch betriebener Fahrzeuge noch weit auseinander.
Energiespeicherung im Fahrzeug	Eine massgebliche Verbreitung im Jahr 2035 hängt vor allem davon ab, ob das Problem der bisher geringen Reichweite mit der Entwicklung bei den Akkumulatoren gelöst werden kann. Die Entwicklung entsprechender Akkumulatoren ist nicht absehbar. Erwartungen in der Fachwelt sind diesbezüglich uneinheitlich.
Behandlung in den Energieszenarien	In den Szenarien der Energieperspektiven des BFE ist die Verbreitung von Elektrofahrzeugen nicht explizit thematisiert. Da eine unerwartete Entwicklung wie beim Wasserstoff nicht auszuschliessen ist, wird der Elektroantrieb als Wild Card mitbeurteilt.

Wasserstoffverbrennungsmotor

Verbrennungsmotor	Wasserstoff dient als Treibstoff im Verbrennungsmotor, der nach dem Prinzip eines Ottomotors arbeitet. Der Wasserstoff wird verflüssigt oder unter Druck (700 bar) in einem Fahrzeugtank mitgeführt.
-------------------	--

Problemfelder	<p>Der Wasserstoffantrieb wird seit mehreren Jahren und von verschiedener Seite als der Antrieb der Zukunft angesehen. Die Meinungen über die weitere Verbreitung sind allerdings kontrovers. Für eine massgebliche Verbreitung sind u.A. Lösungen in den folgenden Bereichen erforderlich:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Energieineffiziente, ökologische Produktion des Wasserstoffs • Erstellen einer heute noch fehlenden Versorgungsinfrastruktur • Angemessene Speicherung im Fahrzeug.
Nicht als verfügbare Option betrachtet	<p>Für eine massgebliche Verbreitung bis 2035 müssten in diesen Feldern sehr grosse zurzeit nicht absehbare Fortschritte erzielt werden, weshalb Wasserstoff noch nicht als verfügbare Option betrachtet wird [vgl. BFE 2007].</p>
Wild Card	<p>Da eine unerwartete Entwicklung nicht auszuschliessen ist, wird Wasserstoff im Sinne einer Wild Card mitbeurteilt.</p>

Brennstoffzelle

Energie aus Wasserstoff	<p>In der Brennstoffzelle wird die für einen Elektromotor benötigte Energie aus Wasserstoff gewonnen. Dieser kann in einem Tank mitgeführt oder aus anderen Treibstoffen an Bord produziert werden. Allerdings verliert das Antriebssystem durch die Umwandlung an Bord erheblich an Effizienz.</p>
Transport von Wasserstoff	<p>Im Vordergrund steht der Transport im Fahrzeug als Druckgas (700 bar) oder in tiefkalter flüssiger Form. Dazu sind grosse und schwere Druckzylinder erforderlich. Alternative Speicherverfahren sind ebenfalls in Entwicklung.</p>
Verbreitung an Wasserstoff gekoppelt	<p>Ein verbreiteter Einsatz der Brennstoffzelle scheint vor allem mit Wasserstoff möglich und ist somit an die Verbreitung von Wasserstoff als Treibstoff gekoppelt (siehe auch Wasserstoffantrieb).</p>

Angenommene Verteilung der Antriebssysteme im Jahr 2035

Verbrennungsmotoren mit 50% Hybridisierung	<p>Für die weitere Betrachtung wird ausgehend von den Energieperspektiven davon ausgegangen, dass weiterhin fast ausschliesslich Verbrennungsmotoren eingesetzt werden. Diese werden jedoch zu einem erheblichen Anteil (Annahme: 50%, s.o.) durch einen Elektroantrieb ergänzt.</p>
Wild Cards	<p>Wasserstoff- und Elektroantrieb werden im Sinne von Wild Cards mitberücksichtigt.</p>

4 Risikoanalyse

4.1 Methode

4.1.1 Vorgehen

Betrachtung der vier Prozesse Um die mögliche Veränderung der Risikolandschaft durch die Verbreitung alternativer Treibstoffe und Antriebskonzepte aufzuzeigen, werden die Risiken zunächst unabhängig von ihrer zukünftigen Verbreitung betrachtet. Dabei werden die folgenden vier Prozesse separat behandelt:

- Lagerung (Kapitel 4.2)
- Transport (Kapitel 4.3)
- Tankstelle (Kapitel 4.4)
- Fahrzeugeinsatz (Kapitel 4.5).

Gruppierung der Treibstoffe Die einzelnen Prozesse werden nach Bedarf weiter unterteilt nach Treibstoffgruppen. Zu diesem Zweck werden Leitstoffe bezeichnet. So können Prozesse, die bei verschiedenen Treibstoffen vergleichbar sind, gemeinsam betrachtet werden.

Die Gruppierung nach Leitstoffen erfolgt nach dem Gefahrenpotenzial, das anhand der unterschiedlichen Zündfähigkeiten (Flammpunkt) und der davon abhängigen Zündwahrscheinlichkeit beurteilt wird:

- Leitstoff Benzin: Benzin, Ethanol, Methanol, ETBE
- Leitstoff Diesel: Diesel, BTL, GTL, CTL, Biodiesel, Pflanzenöl
- Erdgas
- Flüssiggas
- Wasserstoff

Treten bei einzelnen Treibstoffen massgebliche Abweichungen gegenüber dem Leitstoff auf, so wird separat darauf eingegangen.

Ereignisszenarien Ereignisszenarien umschreiben in repräsentativer Form beobachtbare Ereignisse, die zu messbaren Schäden führen (Sach-, Personen-, Umweltschäden). Die Ereignisszenarien werden prozess- und treibstoffspezifisch betrachtet.

Genereller Überblick	<p>Vereinfachend und generell werden folgende Ereignisszenarien unterschieden:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Brand/Explosion: <ul style="list-style-type: none"> - Zündung und Brand flüssiger Treibstoffe (sog. Lachenbrand) - Erhitzung eines dichten Flüssigtreibstoff-Tanks (Druck) und plötzliche Freisetzung mit Zündung (BLEVE) - Plötzliche Freisetzung gasförmiger Treibstoffe und Zündung (explosionsartiger Gaswolkenbrand) - Kontinuierliche Freisetzung und Abbrand gasförmiger Treibstoffe (Freistrahbrand) - Freisetzung und Anreicherung zu explosiver Mischung in Umgebungsluft, Feuerball oder Dampfwolkenexplosion bei Zündung – Bersten von Druckbehältern mit Druckwelle (ohne Zündung) – Vergiftung/Erstickung: Kontakt oder Inhalation gesundheitsschädlicher Substanzen (Säuren, Dämpfe) – Schädliche Einwirkung durch Strom (z.B. Stromschlag) bei elektrischen Antrieben – Mechanische Verletzungen durch antriebsspezifische Fahrzeugkomponenten (z.B. Tankflaschen, Batterie) <p>Schwachstellen und Ursachen, die zu den Ereignisszenarien führen, sind prozess- und treibstoffspezifisch.</p>
Datengrundlagen	<p>Je nach Prozess und Treibstoff liegen unterschiedliche Datengrundlagen vor, sodass differenziert vorgegangen werden muss. Im Wesentlichen können drei Wege unterschieden werden:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Ereignisauswertungen – Ergebnisse aus Risikoermittlungen – Differenzierte Gefahrenanalyse und qualitative Einstufung <p>Wo möglich wird im Sinne eines Schadenerwartungswertes eine Aussage zum Risiko pro Jahr gemacht, ausgedrückt als Anzahl Todesopfer pro Jahr.</p>
Risikomatrix	<p>Unabhängig vom eingeschlagenen Weg, werden Ereignisszenarien mit unterschiedlichem Schadenausmass formuliert und in einer Risikomatrix – jeweils zusammenfassend pro Prozess und Ausmassklasse – abgebildet. Die Risikomatrix enthält fünf Häufigkeits- und vier Ausmassklassen. Um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten werden die Häufigkeiten auf eine Mia. Fahrzeugkilometer normiert.</p>

Tabelle 7:
Häufigkeitsklassen

Klasse	V "sehr un- wahrschein- lich"	IV "unwahr- scheinlich"	III "selten"	II "gelegent- lich"	I "häufig"
Mittlere Anzahl Ereignisse pro 1 Mrd. Fzg.-km	$< 5.0 \cdot 10^{-4}$	$5.0 \cdot 10^{-4}$ bis $< 5.0 \cdot 10^{-3}$	$5.0 \cdot 10^{-3}$ bis $< 5.0 \cdot 10^{-2}$	$5.0 \cdot 10^{-2}$ bis < 0.5	> 0.5

Die Angaben zur Häufigkeit sind auf eine Mia. Fahrzeug-Kilometer nor-
miert.

Tabelle 8:
Ausmassklassen

Klasse	A "klein"	B "mittel"	C "gross"	D "sehr gross"
Bedeutung	Sachschäden, Leichtverletzte	Schwerverletzte	bis einzelne To- desopfer	mehrere Todesop- fer

4.2 Lagerung

4.2.1 Flüssigtreibstoffe

Lagerhaltung in der Schweiz

Rohölbasierte Treibstoffe und Heizöle werden in Stehtankanlagen gelagert. Ein wesentlicher Teil davon erfolgt durch die CARBURA, der Pflichtlagerorganisation der schweizerischen Mineralölwirtschaft, bzw. ihren Mitgliedern. Ende des Jahres 2005 umfasste die Tankkapazität rund 8.2 Mio m³ [Carbura 2006].

Ereignisszenarien

Unfälle in den Stehtanks sind gut dokumentiert und die typischen Ereignisszenarien könne wie folgt umrissen werden [Carbura 2005]:

- Oberflächliches Abfliessen, Lagergut verteilt sich im Areal oder in der Umgebung und gefährdet Oberflächengewässer oder Grundwasser
- Abfliessen in die Kanalisation, Bildung zündfähiger Gasgemische, Explosion, Druckwellen können zu Schäden an umliegenden Einrichtungen und Infrastrukturen führen (sofern ein Anschluss an öffentliche Kanalisation besteht).
- Bassinbrand mit Hitzestrahlung und Rauchentwicklung, die sowohl den Menschen als auch Einrichtungen und Infrastrukturen und die Umwelt in einem grösseren Umkreis gefährden können.
- Boil Over: Beim Bassinbrand kommt es durch Erhitzen von Öl zu spontanem Verdampfen des Wassers am Tankboden und Auswurf von aufschäumendem, brennendem Öl aus dem Tank.

Besonderheiten von
Biotreibstoffen und
gemischten Treibstoffen

Mit der Lagerung von Biotreibstoffen und Gemischen von Benzin oder Diesel mit anderen Treibstoffen bestehen noch keine vergleichbaren umfangreichen Erfahrungen. Folgende Besonderheiten sind zu erwähnen:

- Die Mischung von Biotreibstoffen mit Mineralölkraftstoffen führt möglicherweise zu einer Verschlechterung der Lagerstabilität.

- Alternative Flüssigtreibstoffe und Gemische können die Korrosion in den Lagertanks fördern [AFM+E 2007].
- Beimischungen von Ethanol zu Benzin führen je nach Mischverhältnis zu Dampfdruck-Anomalien und können damit zu einer leichteren Bildung zündfähiger Gemische beitragen.

Risiko pro Jahr Die Risikoabschätzung stützt sich im Wesentlichen auf Ereignisauswertungen im In- und Ausland. Das kollektive Risiko für Stehtankanlagen bezogen auf Treibstoffe beträgt bei einem Absatz von ca. 7 Mio. m³ pro Jahr rund CHF 0.3 Mio. pro Jahr (vgl. Anhang A4).

4.2.2 Erdgas

Zwischenspeicher Zum Ausgleich täglicher und jahreszeitlicher Schwankungen im Erdgasverbrauch werden Speicher als Puffer eingesetzt. Es handelt sich dabei um Röhren- oder Kugelspeicher.

Im Netz enthalten. Die Risiken aus den Zwischenspeichern werden nicht explizit ausgewiesen und beim Transport im Netz subsummiert.

4.2.3 Flüssiggas

Lagerung In der Schweiz gibt es rund 200 Flüssiggasbehälter in rund 100 Anlagen [Gmünder 2006]. Dabei handelt es sich im Wesentlichen um Anlagen am Verbrauchsort, also nicht um grössere Zwischenlager, die hier im Fokus stehen. Das Fehlen einer massgeblichen Zwischenlagerung lässt sich mit dem insgesamt verhältnismässig geringen Verbrauch in der Schweiz begründen.

Ereignisszenarien In der Schweiz sind keine bedeutenden Störfälle im Zusammenhang mit der Lagerung von Flüssiggas oder ähnlichen Gasen bekannt. Grössere Ereignisse traten in den USA jedoch bereits auf (vgl. Anhang A4). Vereinfachend lassen sich folgende Szenarien unterscheiden:

- Oberflächliches Abfliessen, Gas verteilt sich am Boden im Areal oder in der Umgebung, Zündung und Gaswolkenbrand.
- Abfliessen in Keller, Kanäle, Schächte, Gruben etc., Bildung zündfähiger Gasgemische, Gaswolkenexplosion, Druckwellen können zu Schäden an umliegenden Einrichtungen und Infrastrukturen führen.
- Zündung des austretenden Gases und Freistrahbrand, Schädigung benachbarter Anlagenteile möglich. Freistrahbrand ist möglicher Auslöser für Umgebungsbrand oder eines BLEVE.
- BLEVE mit Druckwelle, Hitzestrahlung und Rauchentwicklung, die sowohl Menschen als auch Einrichtungen und Infrastrukturen in einem grösseren Umkreis gefährden können.

Grundlagen Die Risikoabschätzung über die Szenarien erfolgt basierend auf den Erkenntnissen über Häufigkeiten und Ausmasse, aus dem Rahmenbericht [AG F-T 1992] und dem Methodikbeispiel [BUWAL 1996] zur Flüssiggas-Lagerung (vgl. Anhang A4).

Risiko pro Jahr Bezogen auf den aktuellen Verbrauch als Treibstoff sind die Risiken der Lagerung von Flüssiggas heute vernachlässigbar klein.

4.2.4 Wasserstoff

Verteilungsinfrastruktur müsste neu aufgebaut werden Der bestehende Einsatz von Wasserstoff und dessen Lagerung kann kaum als Referenz für den zukünftigen Einsatz dienen. Für einen umfassenderen Einsatz in Fahrzeugen kann nicht auf eine bestehende Infrastruktur zur Treibstofflagerung und -versorgung zurückgegriffen werden. Es ist eine neue Verteilinfrastruktur aufzubauen.

Lager- und Vertriebsmöglichkeiten Da die Lagerung von Wasserstoff aufgrund hohen Drucks oder tiefen Temperaturen aufwändig ist, wird Wasserstoff im betrachteten Zeitraum voraussichtlich nicht in grossen Lagerbehältern und über längere Zeit gelagert. Es stehen folgende Lager- und Vertriebsmöglichkeiten im Vordergrund [vgl. DVW 2007]:

- Eine dezentralisierte Produktion, bei der der Wasserstoff an der Tankstelle selbst produziert wird, so dass keine grössere Zwischenlagerung nötig ist.
- Ein Leitungsnetz (z.B. auch das Erdgasnetz), in das der Wasserstoff am Produktionsort ohne Lagerung direkt eingespeist wird und aus dem es am Verbrauchsort entnommen und ggf. wieder verdichtet oder gekühlt wird.
- Eine zentralisierte Produktion, die mit dem Transport auf der Strasse und/oder Schiene so koordiniert ist, dass keine grosse Lagerhaltung notwendig ist.

Keine Lagerhaltung Die drei genannten Wege beinhalten keine grössere Lagerhaltung, weshalb auf eine quantitative Risikoabschätzung verzichtet wird.

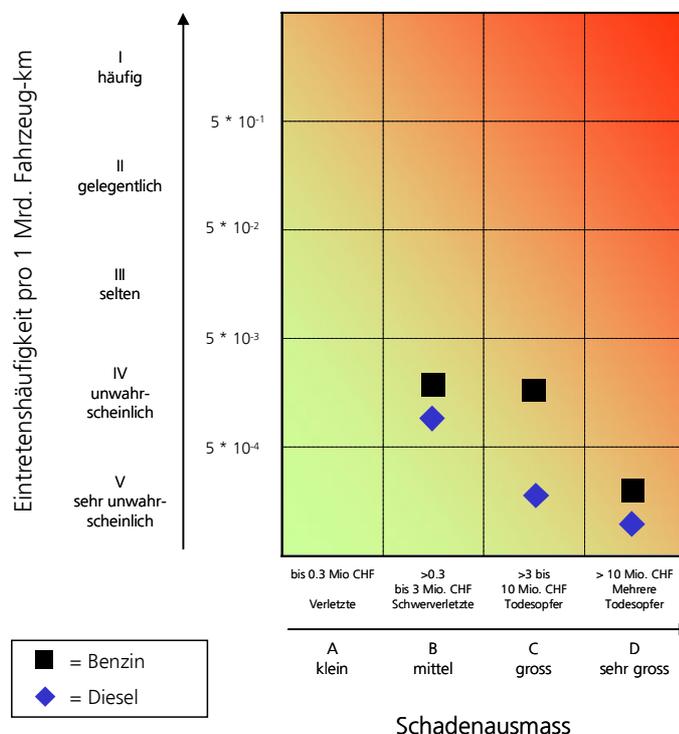
4.2.5 Zusammenfassung der Ergebnisse

Normierte Darstellung Die einzelnen Szenarien zur Lagerung der Treibstoffe sind in Abbildung 8 nach Häufigkeit und Ausmassklasse eingestuft. Die Häufigkeiten sind für den Vergleich normiert auf eine Fahrleistung von 1 Mia. Fz-km.

Seltene aber grössere Ereignisse Die Lagerung wird voraussichtlich weiterhin nur bei Flüssigtreibstoffen eine relevante Bedeutung haben (Leitstoffe Benzin und Diesel). Daher sind in Abbildung 8 auch nur zu diesen Leitstoffen Szenarien bewertet. Es wird deutlich, dass Ereignisse bei der Lagerung vergleichsweise selten auftreten.

Aufgrund der Grösse der Lagertanks handelt es sich meist um grössere Ereignisse.

Abbildung 8:
Ereignisszenarien Lagerung



4.3 Transport

4.3.1 Strasse

Transport Leitstoffe
Benzin und Diesel

Die Leitstoffe Benzin und Diesel fassen die brennbaren Flüssigtreibstoffe zusammen. Diese werden auf der Strasse vorwiegend in Tankfahrzeugen mit einem Fassungsvermögen von 20 m³ bis 40 m³ transportiert.

Transport Flüssiggas

Flüssiggas wird ebenfalls vorwiegend in Tanklastwagen mit einem Fassungsvermögen von 3 bis 12 t unter einem Druck von ca. 8 bar transportiert.

Szenarien für die
Leitstoffe Benzin und Diesel

Die wesentlichen Ereignisszenarien bei den Leitstoffen Benzin und Diesel gehen auf eine äussere Einwirkung (Unfall) oder Fehlmanipulation zurück und führen zu einer Freisetzung:

- Lachenbildung, Verunreinigung von Boden oder Gewässer
- Sofortige Zündung: Treibstoff und Fahrzeug geraten unmittelbar in Brand
- Lachenbildung und verzögerte Zündung

	<ul style="list-style-type: none"> – Eintritt in Kanalisation und anschliessende Zündung mit Explosion
Szenarien für Flüssiggas	<p>Analog zu den Leitstoffen Benzin und Diesel lassen sich die wesentlichen Ereignisszenarien beim Flüssiggas wie folgt umreissen:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Freisetzung mit sofortiger Zündung und Freistrahbrand – Verzögerte Zündung und Gaswolkenbrand und/oder Freistrahbrand – Unterfeuerung mit Bersten des Tanks (BLEVE, siehe Kapitel 2.1.3)
Grundlage für die Risikoabschätzung	<p>Die beschriebenen Szenarien werden im Rahmen der Störfallverordnung eingehend untersucht. Für die Risikoabschätzung kann auf Daten und Grundlagen der Pilotrisikoanalyse für den Transport gefährlicher Güter, Fallbeispiel Autobahn [BUWAL 1999] zurückgegriffen werden.</p>
Risiko pro Jahr, Strassentransport	<p>Bezogen auf das Jahr 2005 und die bezeichneten Szenarien ergibt sich für Flüssigtreibstoffe ein kollektives Risiko (Schadenerwartungswert) von rund CHF 0.5 Mio. pro Jahr (vgl. Anhang A5).</p> <p>Für die geringe Menge Flüssiggas, das im Strassenverkehr zum Einsatz kommt, ergibt sich ein vernachlässigbares kollektives Risiko.</p>

4.3.2 Bahn

Transport von Benzin und Flüssiggas	<p>Der Transport der Leitstoffe Benzin/Diesel und Propan erfolgt in Kesselwagen [BUWAL 1998]:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Benzin/Diesel: Fassungsvermögen von durchschnittlich 60 t. – Propan: Fassungsvermögen von durchschnittlich 42 t.
Ereignisszenarien	<p>Relevante Freisetzungen auf der Strecke erfolgen durch Entgleisungen und Zusammenstösse von Zügen. Diese führen zu grundsätzlich gleichen Freisetzungsszenarien wie beim Strassentransport. Unterschiedlich sind die Freisetzungshäufigkeit, die grösseren Transportmengen pro Einheit sowie eine andere Umgebung im Gleisbereich verglichen mit der Strasse.</p> <p>Quantitative Abschätzungen können sich ebenfalls auf Arbeiten im Rahmen der Störfallverordnung abstützen [BUWAL 1998].</p>
Risiko pro Jahr, Schienentransport	<p>Bezogen auf das Jahr 2005 und die bezeichneten Szenarien ergibt sich für Flüssigtreibstoffe ein kollektives Risiko (Schadenerwartungswert) von rund CHF 0.3 Mio. pro Jahr.</p> <p>Für die geringe Menge Flüssiggas, das im Strassenverkehr zum Einsatz kommt, ergibt sich wie beim Strassentransport ein vernachlässigbares kollektives Risiko.</p>

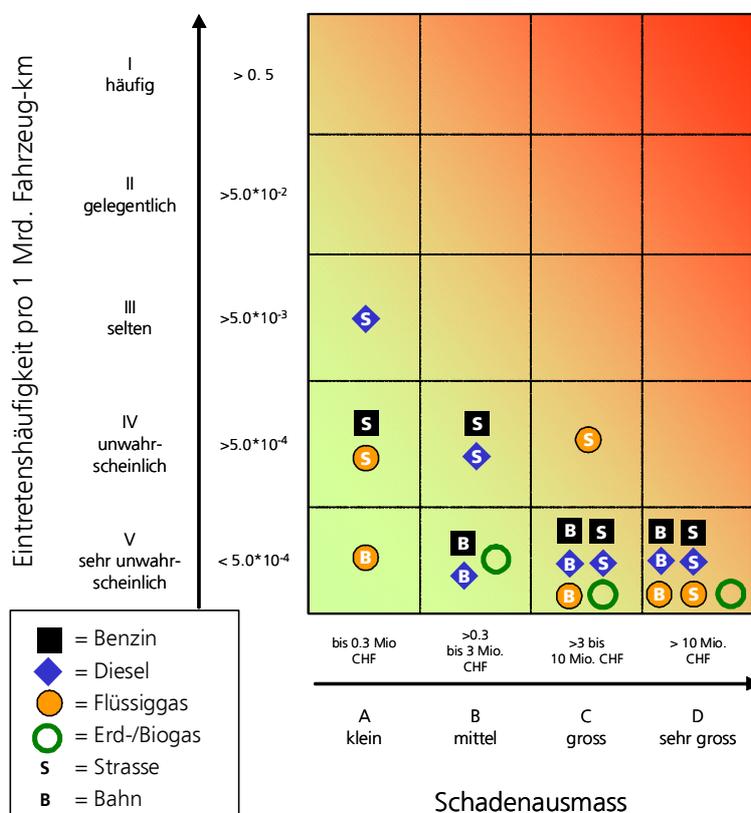
4.3.3 Erdgasleitungen

Leitungsnetz	Das in der Schweiz verbrauchte Erdgas gelangt grösstenteils über die internationale Erdgasleitung zwischen den Niederlanden und Italien in die Schweiz. Innerhalb der Schweiz besteht ein Netz von rund 17'000 km Länge. Der Anteil des Erdgases als Treibstoff macht rund 0.3% des Gesamtverbrauchs aus (2005).
Ereignisszenarien	<p>Die Ereignisszenarien bei der Erdgasleitung bestehen in einer Freisetzung mit Zündung, welche zu Freistrah- und/oder Gaswolkenbränden und/oder Explosionen führen. Störfälle entstehen vor allem durch technisches Versagen an Hochdruck-Gasanlagen (Korrosion, Versagen Schweissnaht) und durch Bau- oder Reparaturarbeiten [Schweizerische Erdgaswirtschaft 1997]:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Sofortige Zündung und Freistrahbrand – Verzögerte Zündung und Gaswolkenbrand und/oder Freistrahbrand <p>Die Risikoabschätzung stützt sich v.a. auf Burgherr [2005]. Demnach sind die Strukturen in Deutschland und der Schweiz vergleichbar, sodass eine entsprechende Ableitung aus Deutschland für die Schweiz möglich ist (vergleichbare Gasnetze und Zustände).</p>
Risiko pro Jahr, Erdgasleitungen	Der weit überwiegende Anteil des im Ergasnetz transportierten Gases dient andern Zwecken als dem Verkehr. Für die geringe Menge Erdgas, das im Strassenverkehr zum Einsatz kommt, ergibt sich ein vernachlässigbares kollektives Risiko.

4.3.4 Zusammenfassung der Ergebnisse

Normierte Darstellung	<p>Die einzelnen Szenarien zum Transport der Treibstoffe sind in Abbildung 9 nach Häufigkeit und Ausmassklasse eingestuft. Die Häufigkeiten sind für den Vergleich normiert auf eine Fahrleistung von 1 Mia. Fz-Km.</p> <p>Zur Darstellung sind folgende Anmerkungen anzufügen:</p>
Unterschiede Benzin / Diesel	Beim Strassentransport von Diesel und Benzin wird in der Summe aller Ausmassklassen von der gleichen Ereignishäufigkeit ausgegangen. Da es beim Benzin leichter zu einer Zündung kommt, ist die Häufigkeit in der Ausmassklasse C grösser. Hingegen sind beim Diesel Ereignisse ohne Zündung (Ausmassklasse A) etwas häufiger. Die exakten Werte in der Ausmassklasse A liegen nahe beieinander, dazwischen liegt jedoch gerade die Klassengrenze.
Bahntransport	Beim Flüssiggastransport mit der Bahn wird im Vergleich zum Benzin die massivere Bauweise der Flüssiggastanks sichtbar. Die Freisetzungswahrscheinlichkeit ist um rund einen Faktor 10 tiefer als bei Mineralölkesselwagen (vergleiche Ausmassklasse A und C).

Abbildung 9:
Ereignisszenarien Transport



4.4 Umschlag an Tankstelle

Elemente des Prozesses

Zum Prozess "Umschlag an Tankstelle" gehören die Anlieferung über die Strasse oder in Leitungen, die Lagerung in ober- oder unterirdischen Tanks, Arbeiten im Bereich der Tankstelle sowie eventuelle äussere Einwirkungen, beispielsweise durch Verkehrsunfälle im Bereich der Tankstelle.

4.4.1 Flüssigtreibstoffe

Keine umfassenden statistischen
Unfallauswertungen

Die Belieferung von Tankstellen mit Benzin und Diesel in Tankwagen, die Flüssigtreibstoff-Lagerung und die Betankung der Fahrzeuge sind alltägliche Prozesse, zu denen umfangreiche Erfahrungen vorliegen, jedoch keine umfassenden statistischen Unfalldaten verfügbar sind.

Grundlagen

Die Risikoabschätzung basiert daher auf einer Gefahrenanalyse und Einstufung in einer Risikomatrix (Anhang A6). Grundlagen bilden exemplarische Unfallbeschreibungen und Plausibilitätsüberlegungen.

Die wesentlichen Ereignisszenarien lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Tabelle 9:
Ereignisszenarien Tankstelle
Flüssigtreibstoffe

Gefährdung	Szenarien
Freisetzung beim Befüllen ab Tankfahrzeug	Entstehen einer Benzinlache und entzündlicher Gase: – keine Zündung – Zündung und Lachenbrand – Zündung, Lachenbrand unter Tank, BLEVE
	Treibstoff gelangt in Kanalisation, Bildung von zündfähigem Gas-Luft-Gemisch: – keine Zündung – Zündung, Explosion
	Treibstoff gelangt in Boden
Leckage an Tank oder Leitungen	Freisetzung in Boden
Arbeiten an Anlage, Beschädigung	Freisetzung, Entstehen einer Benzinlache, evtl. gelangt Treibstoff in Boden
Unfall – Freisetzung durch Kollision mit Zapfsäule	Entstehen einer Benzinlache und entzündlicher Gase, evtl. Zündung und Lachenbrand

Risikoabschätzung

Die Einstufung der einzelnen Ereignisszenarien findet sich im Anhang A6, die zusammenfassende Darstellung über alle Treibstofftankstellen in Kapitel 4.4.5. Charakteristische Punkte sind:

- Die Lagerbehälter für Flüssigtreibstoffe sind unterirdisch angelegt und damit gut vor äusseren Einwirkungen und vor Austreten und der damit verbundenen Bildung explosionsfähiger Gasgemische geschützt.
- Ereignisse bei der Belieferung treten in der Schweiz mehrmals pro Jahr auf. Im Allgemeinen handelt es sich um Freisetzungen geringer Mengen ggf. einiger hundert Liter ohne Zündung.
- Tanksäulen werden mehrmals pro Jahr beschädigt oder umgefahren, ohne dass im Allgemeinen Folgerereignisse daraus entstünden. Das kollektive Personenrisiko ist relativ gering.
- Aufgrund des höher liegenden Flammpunktes ergibt sich für die dem Leitstoff Diesel zugeordneten Treibstoffe eine seltenere Zündung und damit eine geringere Eintretenshäufigkeit für die Brandszenarien.

4.4.2 Erdgas

Belieferung über Erdgasnetz, Komprimierung in Verdichteranlage

Tankstellen beziehen das Erdgas aus dem Netz der örtlichen Gasversorgungsunternehmen. Die Aufbereitung zu CNG (Compressed Natural Gas) erfolgt vor Ort. Dafür verfügen Erdgastankstellen über eine Verdichteranlage, in der das Erdgas auf einen Tankdruck von ca. 250 bar komprimiert und in Blöcken von mehreren Tankzylindern gespeichert wird. Die Verdichteranlage ist vorteilhaft ausserhalb der Verkehrsfläche platziert.

Tabelle 10:
Ereignisszenarien Tankstelle
Erdgas

Gefährdung	Szenarien
Beschädigung von Erdgasleitungen innerhalb der Tankstelle (z.B. Grabarbeiten)	Geringe Freisetzung in Boden und Umgebungsluft, allenfalls Zündung
Beschädigung von Verdichteranlage oder Speicher (Schaden oder externe Einwirkung)	Geringe Freisetzung in Boden und Umgebungsluft, allenfalls Zündung
Fahrzeug kollidiert mit Tanksäule oder Verdichterraum	Freisetzung von Benzin (Fahrzeug), allenfalls Zündung

Risikoabschätzung

Die Einstufung der einzelnen Ereignisszenarien findet sich im Anhang A6, die zusammenfassende Darstellung über alle Treibstofftankstellen in Kapitel 4.4.5. Charakteristische Punkte – insbesondere im Vergleich zur Benzintankstelle – sind:

- Das mit dem Erdgas verbundene kollektive Personenrisiko beim Betrieb von Erdgastankstellen wird als geringer als bei Benzintankstellen beurteilt.
- Im Vergleich zur Benzintankstelle erfolgt keine Anlieferung mit Tankwagen. Entsprechende Gefahrenquellen beim Umschlag entfallen.
- Die Wahrscheinlichkeit der Freisetzung von Treibstoff an Tanksäulen ist geringer als bei Benzin (dichter Betankungsvorgang, auf sehr hohe Drücke ausgelegtes System, Sicherheitsvorkehrungen).
- Aufgrund der raschen Verflüchtigung des Gases besteht bei einer Freisetzung nur ein kurzer Zeitraum der Gefährdung (keine Lachenbildung).
- Die Speicherung erfolgt in vergleichsweise kleinen Batterien von Zylindern, die in einem Verdichtergebäude untergebracht sind. Eine Freisetzung grosser Mengen ist kaum möglich.
- Hingegen besteht das Potenzial für schwere Ereignisse im Falle einer grossen instantanen Freisetzung oder einer Ansammlung grösserer Mengen an Gas in Hohlräumen (Brand und Explosion).

4.4.3 Flüssiggas

Belieferung mit LKW

Das Autogas wird auf der Strasse angeliefert und in oberirdischen oder unterirdischen Flüssiggasbehältern gelagert. Mit vergleichbaren Propangastanks besteht eine breitere Erfahrung (Einsatz für verschiedenste Zwecke). eine spezielle Lösung bieten Kompakttankstellen, bei denen Tank und Säulen eine Einheit bilden.

Tabelle 11:
Ereignisszenarien
Tankstelle Flüssiggas

Gefährdung	Szenarien
Freisetzung beim Befüllen ab Tankfahrzeug (Fahrzeugkollision, Versagen oder Beschädigung Füllleitungen, etc.)	Ausbreitung in Umgebungsluft (ohne Zündung, mit Zündung)

Gefährdung	Szenarien
Beschädigung von Erdgasleitungen innerhalb der Tankstelle (z.B. Grabarbeiten)	Ausbreitung in Boden und/oder Umgebungsluft (ohne Zündung, mit Zündung)
Kollision eines Fahrzeugs mit Tankwagen oder Tank	Entstehen einer Benzinlache, allenfalls Zündung, im Extremfall Unterfeuerung des Tankwagens/Tanks, Druckaufbau und Bersten des Tankwagens/Tanks
Umgebungsbrand	Erhitzung des Tanks, im Extremfall Druckaufbau und Bersten des Tanks

Risikoabschätzung Die Einstufung der einzelnen Ereignisszenarien findet sich im Anhang A6, die zusammenfassende Darstellung über alle Treibstofftankstellen in Kapitel 4.4.5. Charakteristische Punkte – insbesondere im Vergleich zur Benzin-tankstelle – sind:

Bewertung von Flüssiggas im Vergleich zum Leitstoff Benzin

Bewertung im Vergleich zum Leitstoff Benzin:

- Das mit LPG-Tankstellen verbundene kollektive Personenrisiko wird bei oberirdischen Tanks als vergleichbar mit Benzintankstellen eingestuft, wobei die Risiko-Charakteristik deutlich unterschiedlich ist.
- Die Wahrscheinlichkeit der Freisetzung von Treibstoff an Tanksäulen ist geringer als bei Benzin (dichter Betankungsvorgang, auf hohe Drücke ausgelegtes System, Sicherheitsvorkehrungen) → Risiko reduzierend
- Oberirdische LPG-Tanks sind grundsätzlich einer grösseren Gefährdung ausgesetzt (Einwirkungen aus der Umgebung). Dies gilt speziell für Kompaktanlagen, die in unmittelbarer Nähe der Tanksäulen und somit an der Verkehrsfläche liegen → Risiko erhöhend
- In Abhängigkeit der Grösse der Tanks und der unmittelbaren Umgebung (Siedlungsgebiet) besteht das Potential für Störfälle bzw. für schwere Schädigungen → Risiko erhöhend
- Die beiden obigen Punkte entfallen bei unterirdischen Tanks.

4.4.4 Wasserstoff

Tankstellen in der Erprobung

An Wasserstoff-Tankstellen wird seit einiger Zeit die Praxistauglichkeit im Alltag aufgezeigt und weiterentwickelt. Dabei werden sowohl gasförmiger als auch flüssiger Wasserstoff verwendet. Ebenso werden Anlieferung und Lagerung in Tanks sowie Herstellung vor Ort eingesetzt. Technisch sind alle Lösungen machbar und entwickelt. Der Umgang mit gasförmigem Wasserstoff ist beim Fahrzeugeinsatz allerdings einfacher und es scheint, dass diese Form eher favorisiert wird.

Vergleichbarkeit

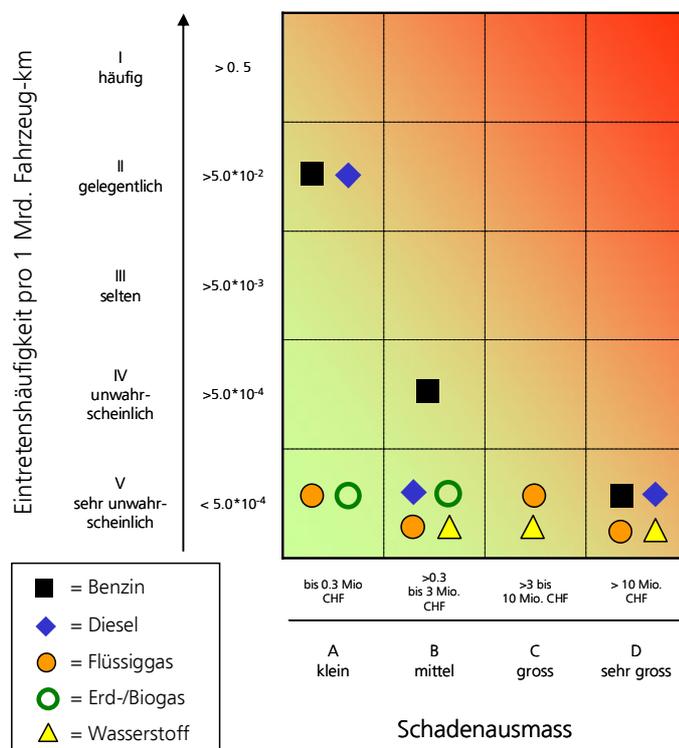
Ausgehend von einer Tankstelle für gasförmigen Wasserstoff, sind Anlagen und Betrieb im Grundsatz vergleichbar mit einer Erdgas- oder Autogas-Tankstelle (z.B. Anlieferung und Lagerung, Betankungssystem).

Ereignisszenarien	Die Ereignisszenarien werden sinngemäss von Erd- oder Autogas übernommen (siehe Tabelle 10 und Tabelle 11).
Risikoabschätzung	<p>Die Einstufung der einzelnen Ereignisszenarien findet sich im Anhang A6, die zusammenfassende Darstellung über alle Treibstofftankstellen in Kapitel 4.4.5. Charakteristische Punkte – insbesondere im Vergleich zur Benzin-tankstelle – sind:</p> <ul style="list-style-type: none">– Das mit dem Wasserstoff-Antrieb verbundene kollektive Personenrisiko im Bereich einer Tankstelle wird vergleichbar mit demjenigen des Erd-gases eingestuft.– Die Wahrscheinlichkeit der Freisetzung von Treibstoff an Tanksäulen ist geringer als bei Benzin (dichter Betankungsvorgang, auf sehr hohe Drücke ausgelegtes System, Sicherheitsvorkehrungen).– Aufgrund der raschen Verflüchtigung des sehr leichten Gases – auch deutlich leichter als Erdgas – ist nur sehr kurzzeitig eine Gefährdung durch freigesetztes Gas denkbar. Kein Lachenbrand möglich wie bei Benzin/Diesel.– Wasserstoff hat eine höhere Zündtemperatur (aber eine geringere Zündenergie) als Benzin und ist vergleichbar mit Erdgas.– Die Auswirkungen im Falle einer grossen instantanen Freisetzung oder bei einer Ansammlung grösserer Mengen an Gas in Hohlräumen sind potenziell deutlich grösser als bei Benzin (Brand und Explosion).

4.4.5 Zusammenfassung

Überblick	Der Überblick in der Risikomatrix zeigt, dass die Eintretenshäufigkeit von Ereignissen bei gasförmigen Treibstoffen kleiner eingestuft ist. Dagegen ist unter bestimmten Bedingungen ein höheres Schadenpotenzial möglich (Ausmassklassen C und D).
-----------	---

Abbildung 10:
Ereignisszenarien Umschlag an
Tankstelle



Ereignisse mit
kleinem Ausmass

Diesel und speziell Benzin weisen grössere Häufigkeiten bei Ereignissen mit vergleichsweise kleinem Ausmass auf. Dies ist einerseits auf die Eigenschaften der Treibstoffe zurückzuführen; andererseits sind die geschlossenen Betankungssysteme bei den Gasen dafür verantwortlich.

Erdgas:

Erdgas wird an der Tankstelle etwas günstiger eingestuft als die übrigen Treibstoffe, da keine Belieferung über die Strasse und Umschlag an der Tankstelle erfolgt und die Speichermenge geringer ist.

Störfälle

Bei allen Treibstoffen, die in grösseren Behälter angeliefert und gelagert werden, sind Störfälle mit einer schweren Schädigung nicht auszuschliessen.

Aspekt der Einsatzkräfte

Ein spezielles Augenmerk gilt bei den gasförmigen Treibstoffen den Einsatzkräften bei Freisetzungen (spezifische Ausbildung, adäquate Absperung und Sicherung, etc.), damit eine Eskalation möglichst unterbunden werden kann.

4.5 Fahrzeugeinsatz

Elemente des Prozesses

Zum Prozess Fahrzeugeinsatz gehören das Betanken des Fahrzeugs, der Normalbetrieb sowie Unfallsituationen.

4.5.1 Flüssigtreibstoffe

Einsatz von Benzin und Diesel
alltäglich und recht sicher

Im Betrieb von Benzin und Dieselfahrzeugen besteht eine umfassende Erfahrung. Trotzdem sind vergleichsweise wenige Grundlagen verfügbar, die explizit auf treibstoffbedingte Risiken – insbesondere Personenrisiken – im Betrieb der Fahrzeuge eingehen.

Ein vergleichbares Sicherheitsniveau wird für alternative Flüssigtreibstoffe wie Ethanol und synthetische Treibstoffe angenommen. Auf spezielle Eigenheiten wird im Folgenden eingegangen, wenn deutliche Abweichungen zu erwarten sind.

Charakteristika

Die Mehrzahl der Fahrzeuge weist Tankvolumen im Bereich von 30 bis 70 Litern auf. Die Behälter sind Unterflur bzw. vor Kollisionen weitgehend geschützt angeordnet. Zu beachten sind im Zusammenhang mit den Risiken beim Fahrzeugeinsatz insbesondere folgende Charakteristika:

- Flammpunkt, Zündtemperatur:
 - Benzin: -21°C , 220°C (heisse Flächen für Selbstzündung ausreichend).
 - Diesel: $>55^{\circ}\text{C}$, 220°C
 - Ethanol: 17°C , 425°C

Weitere Treibstoffe und Eigenschaften siehe Tabelle 4 und Anhang A1

- Sowohl der Tankbehälter als auch das Betankungssystem sind im Vergleich zu gasförmigen Treibstoffen ein vergleichsweise "offenes" System (Überfüllen, Austritte, Dämpfe, etc.).

Tabelle 12:
Ereignisszenarien

Gefährdung	Szenarien
Betankung (Normalbetrieb): Freisetzung beim Befüllen des Fahrzeugs	Entstehen einer Treibstofflache (mit / ohne Zündung)
Fahrzeugeinsatz (Normalbetrieb): Freisetzung aufgrund Leckage an Tank, Leitungen oder Motor (Entzündung an heißen Teilen)	Fahrzeugbrand (im Freien, in geschlossenem Raum)
Unfall: Kollision mit Freisetzung aufgrund Beschädigung von Tank oder Leitungen (Motor)	Freisetzung (mit/ohne Zündung im freien oder in geschlossenem Raum, Tunnel)

Risikoabschätzung

Die Einstufung der einzelnen Ereignisszenarien in Ausmass- und Häufigkeitsklassen findet sich im Anhang A7, die zusammenfassende Darstellung über alle Treibstoffe und Antriebe in Kapitel 4.5.7. Charakteristische Punkte sind:

- Das mit dem Flüssigtreibstoff verbundene kollektive Personenrisiko wird auf 1 bis 5 Todesopfer pro Jahr geschätzt (schwere Verkehrsunfälle mit Todesfolgen verursacht durch einen Brand, vgl. Anhang A7).
- Die Gefährdung durch Diesel, Biodiesel und Pflanzenöl wird im Vergleich zu Benzin geringer eingestuft.
- Beim Ethanol ist bei Mischungen mit geringem Ethanolanteil die mögliche höhere Verdampfung und damit leichtere Bildung zündfähiger Gemische zu beachten.
- Beim Methanol ist auf die Giftigkeit hinzuweisen, die bei der Betankung besondere Sicherheitsmassnahmen erfordert⁶⁾.

4.5.2 Methan (Erd-/Biogas)

Charakteristika	<p>Im Vergleich zu Fahrzeugen, die mit Flüssigtreibstoffen betrieben werden weisen Erdgas-Fahrzeuge u.a. folgende spezifische Eigenheiten auf:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Dicht schliessender Füllstutzen (Tanknippel) – Gaszylinder als Speichereinheit (Berstdruck 600 bis 700 bar) – Hochdruckleitung und –regler
Gastanks und Anordnung	<p>Erdgas wird im Fahrzeug in gasförmiger Form mit ca. 230 (200-250) bar meist in mehreren zylinderförmigen Tanks gelagert. Die Tankflaschen sind bisher meist aus Stahl, teilweise aus Verbundwerkstoffen (Alu/Stahl und Karbonfasern). Im Fahrzeug können sie unterschiedlich angeordnet sein:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Unterfluranordnung: im Fahrzeugboden zwischen den Achsen oder hinter der Hinterachse – Innenraumanordnung: im Lade- oder Kofferraum (z.B. bei Nachrüstung) – Rahmenanordnung: unterhalb der Ladefläche bei Pritschenwagen und Fahrzeugen mit Sonderaufbauten – Dachtank: bei Bussen (grosses Tankvolumen möglich)
Bivalente Fahrzeuge	<p>Bei bivalenten Fahrzeugen, die sowohl Erdgas als auch Benzin verbrennen, treten grundsätzlich die Risiken beider Systeme – Gas und Benzin – auf. Mit zunehmender Verdichtung des Tankstellennetzes einerseits und Entwicklung spezifisch optimierter Gasfahrzeuge andererseits dürfte der Anteil der bivalenten Fahrzeuge abnehmen.</p>
Ereignisszenarien	<p>Gefährdungen entstehen durch die mögliche Freisetzung von Gas und allenfalls durch mechanische Wirkung der schweren Gasflaschen (vorwiegend Umrüstfahrzeuge).</p>

6) Gilt nicht im Zusammenhang mit der heute maximal möglichen Beimischung als Treibstoffzusatz.

Tabelle 13:
Ereignisszenarien

Gefährdung	Szenarien
Betankung: Freisetzung beim Befüllen des Fahrzeugs	Freisetzung, Bildung zündfähigen Gemisches: (ohne / mit Zündung im Freien oder im Fahrzeug)
Fahrzeugeinsatz: Freisetzung aufgrund Leckage an Tank, Leitungen oder Motor	Freisetzung, Bildung eines zündfähigen Gemisches: ohne / mit Zündung im Freien oder in einem geschlossenen Raum (Garage)
Unfall: Kollision mit Freisetzung aufgrund Beschädigung von Tank oder Leitungen	Freisetzung, Bildung eines zündfähigen Gemisches: ohne / mit Zündung im Freien oder in einem geschlossenen Raum (Tunnel)
Brand und Erhitzen des Tanks (mit oder ohne Kollision)	Kontrolliertes Abblasen, Freistrahbrand
Auffahrunfall (Heck)	Verschieben des Tanks in den Fahrgastraum, Verletzungen durch den Tank (wenn der Tank im Fahrgastraum oder der Verformungszone des Fahrzeugs liegt).

Die Abschätzungen basieren auf den Systembeschreibungen, exemplarischen Unfallbeispielen, den sicherheitsrelevanten Eigenschaften sowie Plausibilitätsüberlegungen und Quervergleichen.

Risikoabschätzung

Die Einstufung der einzelnen Ereignisszenarien findet sich im Anhang A7, die zusammenfassende Darstellung über alle Treibstoffe und Antriebe in Kapitel 4.5.7. Charakteristische Punkte sind:

- Das mit dem Erdgas-Antrieb verbundene kollektive Personenrisiko wird im Vergleich mit Benzin als geringer eingestuft.
- Unterschiede zu Benzin aufgrund der Eigenschaften des Erdgases sind:
 - Gas, das sich im Freien rasch verflüchtigt, keine Lachenbildung
 - Höhere Zündtemperatur, Explosionsgrenze
- Die Wahrscheinlichkeit einer Freisetzung erheblicher Treibstoffmengen im Betrieb ist geringer als bei Benzin (auf hohen Druck ausgelegtes und auf Undichtheit überwacht Treibstoffsystem).
- Gastank, der hohen mechanischen Einwirkungen standhält. Sicherung bei Abreißen von Leitungen.
- Bei einem Temperaturanstieg im Tank, beispielsweise durch Brand des Fahrzeugs kann es während kurzer Zeit zu einem Ablassen des Gases und einem Freistrahbrand kommen (Sicherheitsmassnahme gegenüber einem Bersten des Tanks). Der Vorgang kann Personen gefährden (zu bergende Personen, Einsatzkräfte).
- Die Ansammlung von Gasen und Bildung eines zündfähigen Gemisches ist nicht auszuschliessen (Brand, Explosion in geschlossenen Räumen).
- Die Nachrüstung von Fahrzeugen mit schweren Tankflaschen im Gepäckraum kann die passive Sicherheit des Fahrzeugs bei einem Heck-

aufprall nachteilig beeinflussen (insbesondere Gefährdung von Personen auf den Rücksitzen).

Aspekt Einsatzkräfte Die Wahrscheinlichkeit einer Freisetzung ist klein bzw. kleiner als bei Benzin. Trotzdem erfordert es spezifische Vorkehrungen der Einsatzkräfte.

4.5.3 Flüssiggas

Charakteristika Die bei den Erdgas-Fahrzeugen aufgeführten Charakteristika gelten ähnlich für Flüssiggas-Fahrzeuge. Ein Unterschied besteht darin, dass der Gastank auf einen geringeren Druck ausgelegt ist (ca. 30 bis 40 bar). Dadurch ist er leichter und es sind auch eher der Karosserie angepasste Formen möglich (z.B. passend in Reserveradmulde). Für weitere Anmerkungen (bivalente Fahrzeuge, Ereignisszenarien siehe Erdgas-Fahrzeuge).

Unterschiede zu Erdgas Zu beachten sind die unterschiedlichen Eigenschaften von Flüssiggas-Antrieben im Vergleich zu Erdgas-Antrieben:

- Weniger widerstandsfähige Tanks aufgrund des geringeren Drucks als beim Erdgas
- Tiefere Zündtemperatur von Flüssiggas (ca. 450 °C anstelle von ca. 650°C)
- Tiefere Zündgrenze von Flüssiggas (1.9 – 9.5% anstelle von 5 – 15% Anteil am Luftgemisch)
- Höhere Dichte, die eine Ansammlung in Bodennähe ermöglicht.

Risikoabschätzung Die Abschätzungen basieren auf den Systembeschreibungen, exemplarischen Unfallbeispielen, den sicherheitsrelevanten Eigenschaften sowie Plausibilitätsüberlegungen und Quervergleichen.

Die Einstufung der einzelnen Ereignisszenarien findet sich im Anhang A7, die zusammenfassende Darstellung über alle Treibstoffe und Antriebe in Kapitel 4.5.7. Charakteristische Punkte in Abweichung zum Erdgasfahrzeug sind:

- Das mit dem Flüssiggas-Antrieb verbundene kollektive Personenrisiko wird im Vergleich zu Erdgas als etwas grösser eingestuft.
- Dies begründet sich vorwiegend durch die etwas ungünstigeren sicherheitsrelevanten Eigenschaften des Flüssiggases (siehe Anhang A1)
- In der Schweiz verkehren Nachrüstfahrzeuge, für die die Anmerkungen zur passiven Sicherheit beim Erdgas-Fahrzeug speziell zu erwähnen sind (abhängig vom System des Tanks).

4.5.4 Wasserstoff

Unterschiedliche Ansätze	<p>Wasserstoff kann auf unterschiedliche Weise eingesetzt werden, was sich auch auf den Aspekt der Sicherheit auswirkt:</p> <ul style="list-style-type: none">– Einsatz im Verbrennungsmotor.– Einsatz in Brennstoffzelle zur Stromgewinnung, Antrieb mittels Elektromotor. <p>Die Speicherung im Fahrzeug kann verflüssigt (LH₂) oder gasförmig unter hohem Druck erfolgen (CGH₂; bis 700 bar⁷⁾. Auch ist es möglich, den Wasserstoff direkt im Fahrzeug aus Energieträgern herzustellen.</p>
Wesentliche Aspekte	<p>Beim Einsatz in Verbrennungsmotoren und in der Brennstoffzelle sind die Betankung, die Speicherung in grossen und schweren Fahrzeugtanks im Fahrzeug und die Stoffeigenschaften massgebliche Einflussgrössen. Bei der Herstellung im Fahrzeug kommen die sicherheitsrelevanten Eigenschaften des Energieträgers und dessen Speicherung sowie die Gefahren beim Reformierungsprozess hinzu (Temperaturen, Druck). Beim Einsatz in der Brennstoffzelle sind zudem die elektrischen Gefahren zu beachten.</p> <p>Den verschiedenen Optionen entsprechend sind die Sicherheitsaspekte und Gefahren unterschiedlich.</p>
Risikoabschätzung und spezielle Eigenheiten	<p>Die Abschätzungen basieren auf den Systembeschreibungen, exemplarischen Unfallbeispielen, den sicherheitsrelevanten Eigenschaften sowie Plausibilitätsüberlegungen und Quervergleichen.</p> <p>Die Einstufung der einzelnen Ereignisszenarien findet sich im Anhang A7, die zusammenfassende Darstellung über alle Treibstoffe und Antriebe in Kapitel 4.5.7. Charakteristische Punkte in Abweichung zum Erdgasfahrzeug sind:</p> <ul style="list-style-type: none">– Das mit dem Wasserstoff-Antrieb verbundene kollektive Personenrisiko wird beim Einsatz in einem Verbrennungsmotor als vergleichbar mit demjenigen von Erdgasfahrzeugen eingestuft.– Die Wahrscheinlichkeit der Freisetzung erheblicher Treibstoffmengen im Betrieb (inkl. Betankungsvorgang) ist geringer als bei Benzin (dichter Betankungsvorgang, auf hohe Drücke ausgelegtes System, Sicherheitsvorkehrungen).– Einer im Vergleich zu flüssigen Treibstoffen kleineren Ereigniswahrscheinlichkeit steht unter bestimmten Bedingungen ein höheres Schadenpotenzial gegenüber (Ansammlung von Gas).– Die Eigenschaften von Wasserstoff wirken sich günstig aus (Flüchtigkeit, hoher Flammpunkt und Zündtemperatur, etc.). Allerdings ist eine

7) Weitere Speicherformen siehe Anhang A2.

Ansammlung der leichten Gase in geschlossenen Räumen nicht auszu-schiessen.

- Eine eigene Gefahr bildet die Unsichtbarkeit einer Wasserstoffflamme.
- Die Anmerkungen zu den Einsatzkräften im Falle von Ereignissen gelten wie bei den übrigen gasförmigen Treibstoffen. Gleichermassen ist diesbezüglich auf die elektrischen Gefahren beim Einsatz einer Brennstoffzelle hinzuweisen (siehe Hybrid- und Elektrofahrzeuge).

4.5.5 Elektroantrieb

Bisherige Betriebserfahrung	Mit batteriebetriebenen Fahrzeugen besteht eine langjährige Erfahrung, doch hat sich das Einsatzgebiet auf Nischen beschränkt. Eine vergleichbar umfassende Erfahrung wie mit Flüssigtreibstoff betriebenen Fahrzeugen liegt daher nicht vor. Dies gilt auch für Unfälle.
Dynamik in der Entwicklung	Zudem handelt es sich bei bisher eingesetzten Elektrofahrzeugen (Kleinstserien, Leichtbaufahrzeuge, Spezialfahrzeuge, etc.) selten um Fahrzeuge, die mit zukünftigen Konzepten vergleichbar sind. Eine Übertragung der aktuellen Erfahrung, ist daher nicht ohne weiteres möglich. Da die Entwicklung von Grossserienfahrzeugen erst in jüngster Zeit mit Nachdruck erfolgt, ist auch bezüglich der Sicherheit nur eine beschränkte Aussage möglich. Im Folgenden kann daher nur auf die grundsätzliche Problematik in einzelnen Punkten eingegangen werden.
Generelle Gefahren	Im Zusammenhang mit der hohen elektrischen Spannung und den Bestandteilen der Batterien sind einige spezifische Gefahren hervorzuheben: <ul style="list-style-type: none"> – Mechanische Beschädigung der Batterie durch Unfall (mit verschiedenen Folgen). – Brand durch Überhitzung/Überspannung; Freisetzung von giftigen Verbrennungsprodukten. – Austritt von Batterieelektrolyten (unterschiedliche Ursachen). – Stromschlag/Batterieentladung (unterschiedliche Ursachen).
Energiespeicherung	Ein massgeblicher Unterschied zu den Flüssigtreibstoffen besteht in der Energiespeicherung. Anstelle eines Tanks treten z.T. voluminöse und schwere Akkumulatoren, die gut gegenüber mechanischen Einwirkungen geschützt werden müssen.
Produkthaftung und Image als ein Treiber	Es ist davon auszugehen, dass die für Grosserien erforderliche Verfügbarkeit, Zuverlässigkeit und Sicherheit der Systeme vor einem breiten Einsatz erreicht werden (Randbedingung), da die Unternehmensrisiken für grosse Hersteller bezüglich Produkthaftung und Image ansonsten erheblich sind.

Tabelle 14:
Ereignisszenarien
Elektroantrieb

Gefährdung	Szenarien
Ladevorgang: Überhitzung aufgrund Überladen oder Kurzschluss, hohe elektrostatische Ladung kann zur Entzündung führen	Entzündung und Brand/Explosion, Freisetzung von giftigen Verbrennungsprodukten
Fahrzeugeinsatz: Überhitzung aufgrund Überladung oder Kurzschluss, hohe elektrostatische Ladung kann zur Entzündung führen	Entzündung und Brand/Explosion, Freisetzung von giftigen Verbrennungsprodukten
Unfall: Kollision mit mechanischer Einwirkung auf Akkumulatoren oder Kabel	Beschädigung der Hülle des Akkumulatoren: – Entzündung und Brand/Explosion, Freisetzung von giftigen Verbrennungsprodukten – Freisetzung giftiger und/oder ätzender Substanzen – Stromschlag
	Verschieben der Akkumulatoren in Fahrgastraum, Verletzungen

Risikoabschätzung

Die Abschätzungen basieren auf den Systembeschreibungen, exemplarischen Unfallbeispielen, den sicherheitsrelevanten Eigenschaften sowie Plausibilitätsüberlegungen und Quervergleichen.

Die Einstufung der einzelnen Ereignisszenarien findet sich im Anhang A7, die zusammenfassende Darstellung über alle Treibstoffe und Antriebe in Kapitel 4.5.7. Charakteristische Punkte sind:

- Das mit dem Elektro-Antrieb verbundene kollektive Personenrisiko wird insgesamt als mit Benzin vergleichbar hoch eingestuft. Die Einschätzung bezieht sich auf in grosser Serie eingeführte Fahrzeuge, bei denen verschiedene erkannte Schwachstellen befriedigend technisch gelöst werden.
- Offene Punkte bestehen [gemäss Stepken 2009] heute im Bereich der Crash-Sicherheit mit spezifischen Anforderungen, die stärker auf die Eigenheiten der Elektrofahrzeuge eingehen (Heck-Crash, Einbau der Batterien, Freisetzung von Stoffen, etc.).
- Ein besonderes Augenmerk gilt dem Feuerwehreinsatz bei Ereignissen mit Elektrofahrzeugen. Die Antriebsart und eine mögliche Gefährdung sind oft nicht sofort erkennbar (hohe Spannung, Batteriebestandteile).
- Auch ist die höhere Komplexität des gesamten Systems mit allen Sicherheitsvorkehrungen für Unterhaltsbetriebe eine Herausforderung (Gefährdung durch unsachgemässen Unterhalt → Regelung, Aus- und Weiterbildung).
- Der geräuschlose Antrieb kann zur Folge haben, dass Fussgänger, insbesondere sehbehinderte Personen, weniger auf Elektrofahrzeuge achten. Die Thematik ist erkannt.

4.5.6 Hybridantrieb

Kombination der Antriebe	Als Hybridantrieb wird im Folgenden primär die Kombination von Verbrennungsmotor ⁸⁾ und Elektroantrieb verstanden. Prinzipiell sind in dieser Kombination die sicherheitstechnischen Nachteile beider Systeme enthalten.
Abstufung	Wie in Kapitel 2.2.2 ausgeführt, besteht eine breite Abstufung der Hybridisierung von Mild-Hybrid über Voll-Hybrid bis hin zum Plug-In-Hybrid, der einem reinen Elektroantrieb nahe kommt.
10 Jahre Erfahrung	Sowohl Mild- wie auch Voll-Hybride werden bereits in grosser Stückzahl hergestellt und es besteht rund 10 Jahre Betriebserfahrung.
Risikoabschätzung	Die Abschätzungen basieren auf den Systembeschreibungen, exemplarischen Unfallbeispielen, den sicherheitsrelevanten Eigenschaften sowie Plausibilitätsüberlegungen und Quervergleichen.

Die Einstufung der einzelnen Ereignisszenarien findet sich im Anhang A7, die zusammenfassende Darstellung über alle Treibstoffe und Antriebe in Kapitel 4.5.7. Charakteristische Punkte sind:

- Die erwähnten prinzipiellen Nachteile durch die Kombination beider Antriebe sind in der Praxis nicht offensichtlich erkennbar. Es finden sich keine entsprechenden Hinweise.
- Die Fahrzeuge weisen hohe Spannungsniveaus auf, was insbesondere für Einsatzkräfte im Ereignisfall eine Gefährdung bedeuten kann. Zudem ist das Spannungsniveau je nach Hybridart unterschiedlich hoch, was nicht sofort erkennbar ist (siehe Anmerkung beim Elektroantrieb).
- Aufgrund der zunehmenden Elektrifizierung (Bordnetze mit höherer Spannung) auch herkömmlicher Fahrzeuge sind elektrische Gefahren auch für andere Antriebskonzepte von zunehmender Bedeutung.

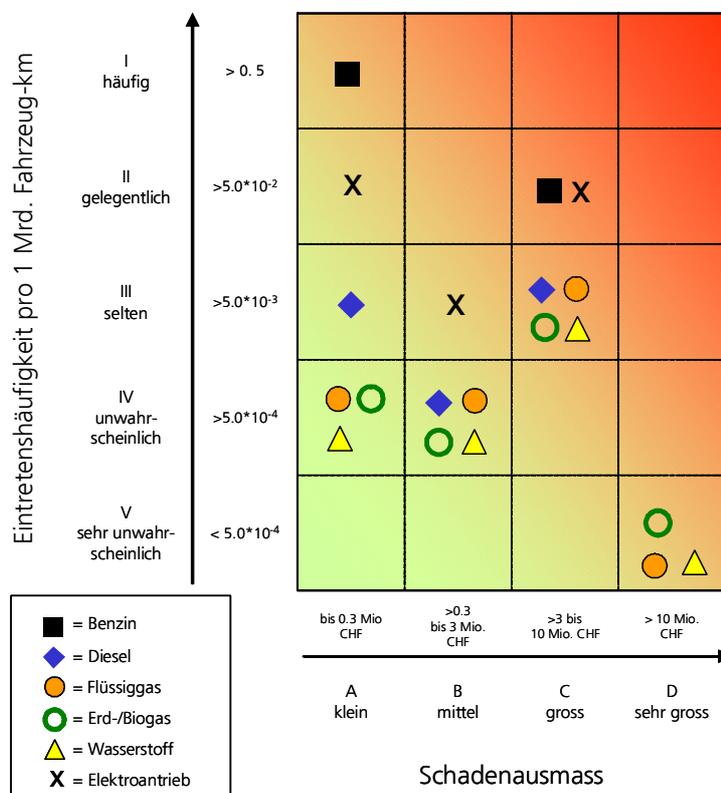
4.5.7 Zusammenfassung

Überblick	Der Überblick in der Risikomatrix (vgl. Abbildung 11) zeigt, dass die Eintretenshäufigkeit in den unterschiedlichen Ausmassklassen bei Benzin- und Elektrofahrzeugen vergleichbar hoch eingestuft wird. Bei Treibstoffen, die dem Leitstoff Diesel zugeordnet werden, sind die entsprechenden Wahrscheinlichkeiten etwas tiefer.
Gasförmige Treibstoffe	Die gasförmigen Treibstoffe werden bezüglich der Risiken des Fahrzeugeinsatzes gleich eingestuft (mögliche Unterschiede drücken sich nicht relevant aus). Charakteristisch ist, dass auch grössere Schäden der Ausmassklasse D

8) Flüssigtreibstoff oder Gas

nicht ausgeschlossen sind (Ansammlung und Zündung von Gasen in geschlossenen Räumen).

Abbildung 11:
Risikomatrix
Fahrzeugeinsatz



Aspekt Einsatzkräfte

Neben den treibstoffspezifischen Aspekten gilt bei nahezu allen alternativen Treibstoffen und Antrieben der Hinweis auf die Einsatzkräfte: Unklare bzw. nicht standardisierte Kennzeichnung und Handhabung der Fahrzeuge sowie unterschiedliche Gefahren (Gas, hohe Spannung) gefährden Personen und erschweren eine rasche und adäquate Intervention im Ereignisfall.

5 Gesamtbetrachtung und Ausblick auf 2035

5.1 Risikoübersicht

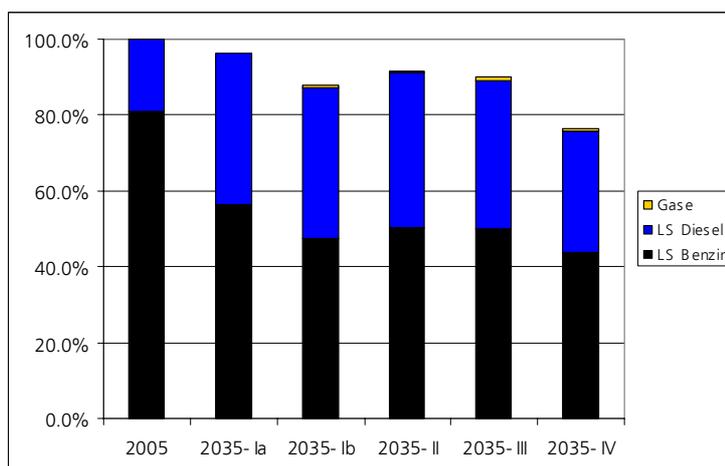
Kollektives Personenrisiko

Bezogen auf das Jahr 2005 wird das kollektive Todesfallrisiko, verursacht durch Treibstoffe, auf ein bis fünf Todesopfer pro Jahr geschätzt. Der Wert wird bestimmt durch schwere Verkehrsunfälle beim Fahrzeugeinsatz. Lagerung und Transport tragen nur geringfügig zum Risiko bei. Bezogen auf das gesamte kollektive Todesfallrisiko im Strassenverkehr beträgt der Anteil des treibstoffbedingten Risikos unter 1%.

Veränderungen bis 2035

Für das Jahr 2035 werden gemäss Energieperspektiven des BFE verschiedene Veränderungen erwartet: Zunahme der Fahrleistung, geänderter Treibstoff-Mix, abnehmender Energieverbrauch je Fahrzeugkilometer (vgl. Kapitel 3). Werden die erwarteten Entwicklungen zugrunde gelegt, so entsteht für die unterschiedlichen Szenarien – trotz zunehmender Verkehrsleistung – ein Rückgang des kollektiven Todesfallrisikos. Dieses lässt sich grob auf die verschiedenen Treibstoffgruppen, die in den Energieperspektiven enthalten sind, aufteilen.

Abbildung 12:
Kollektives Risiko bei
unterschiedlichen Szenarien nach
Treibstoff-Gruppen
(2005=100%)



Reduktion

Es kann demnach bei allen Szenarien trotz teilweise zunehmender Fahrleistung in der Schweiz von insgesamt abnehmenden treibstoff- und antriebsbedingten Risiken ausgegangen werden. In den Leitstoffen enthalten sind auch Hybridantriebe.

Allgemeine Entwicklung in der
Verkehrssicherheit

Darüber hinaus ist anzumerken, dass wie in der Vergangenheit, mit einer weiteren Entwicklung in der aktiven und passiven Fahrzeugsicherheit und auch bei der Infrastruktur gerechnet werden darf. Dadurch wird die Häu-

figkeit und Schwere von Verkehrsunfällen reduziert. Treibstoffbedingte Gefahren, ausgelöst durch einen Verkehrsunfall, reduzieren sich dadurch ebenfalls. Die entsprechende Entwicklung ist in Abbildung 12 nicht enthalten.

Veränderungen in der
Risikocharakteristik

Das aktuelle kollektive Personenrisiko ist insbesondere beim Fahrzeugeinsatz geprägt durch das Brandrisiko der Flüssigtreibstoffe. Die Wahrscheinlichkeit entsprechender Ereignisse ist bei Gastreibstoffen eher geringer einzustufen (Treibstoffsysteme ausgelegt auf hohe Drücke, massive Speicher). Hingegen ist unter ungünstigen Bedingungen nicht ausgeschlossen, dass grössere Schadenausmassen eintreten (Verschiebung zu kleineren Wahrscheinlichkeiten und potentiell grösseren Schadenausmassen).

5.2 Entwicklung bei einzelnen Prozessen und Treibstoffen

5.2.1 Lagerung

Flüssigtreibstoffe

Bei den Flüssigtreibstoffen ist eine Reduktion der Gesamtmenge und Verschiebung innerhalb der Treibstoffarten bis ins Jahr 2035 zu erwarten. Dies führt über das Gesamtsystem betrachtet zu einer Risikoreduktion. Spezielle Eigenschaften einzelner alternativer Flüssigtreibstoffe und Gemische, die beispielsweise Korrosion in den Lagertanks fördern können [AFM+E 2007], bedürfen des Augenmerks. Der Anteil dieser Treibstoffe ist jedoch vergleichsweise gering.

Erdgas/Biogas

Die Lagerung von Erdgas/Biogas entfällt aufgrund der direkten Verteilung via Rohrleitungsnetz weitgehend (nur Zwischenspeicherung zum Druckausgleich im Netz).

Flüssiggas

Flüssiggas (Autogas) spielt heute eine Nischenrolle und dies dürfte auch in Zukunft so bleiben. Die Lagerung stützt sich auf eine bewährte Technologie. Die weiterhin eher geringe Verbreitung lässt keine Risikoveränderung im Gesamtsystem erwarten. Dies gilt auch für alternative Treibstoffe wie DME. Grössere Lagertanks unterliegen zudem der Störfallverordnung.

Wasserstoff

Neben der Frage, ob und in welchem Umfang Wasserstoff bis ins Jahr 2035 zum Einsatz kommt, bestehen für den Einsatz von Wasserstoff verschiedene Optionen, sodass Aussagen mit erheblicher Unsicherheit behaftet sind. Wird von einer zentralen Herstellung ausgegangen, ist auch eine entsprechende Lagerung erforderlich. Dafür gelten sinngemäss die gleichen Aussagen wie beim Flüssiggas. Bei einer dezentralen Produktion entfällt eine Lagerung im grossen Umfang.

5.2.2 Transport

Flüssigtreibstoffe	Für den Transport gelten die gleichen Aussagen wie für die Lagerung. Tendenziell ist mit einer Risikoreduktion im Gesamtsystem zu rechnen.
Erdgas/Biogas	Die Verteilung erfolgt im Rohrleitungsnetz. Der Verkehr ist im Vergleich zu den übrigen Abnehmern des Erdgases nicht bedeutend. Auch bei mengenmässigen Veränderungen entsteht dadurch kein relevanter Einfluss auf das Risiko des Gesamtsystems.
Flüssiggas	Die Verteilung erfolgt vorwiegend auf der Strasse. Entsprechende Transporte finden heute bereits statt und unterliegen der Störfallverordnung. Ausgehend von einer weiterhin eher geringen Verbreitung ist kein massgeblicher Einfluss auf das Risiko des Gesamtsystems zu erwarten.
Wasserstoff	Sofern Wasserstoff überhaupt zu transportieren ist (siehe Anmerkung bei der Lagerung), gelten sinngemäss die gleichen Aussagen wie für Flüssiggas.

5.2.3 Umschlag und Lagerung an Tankstellen

Flüssigtreibstoffe	Beim Umschlag und der Lagerung der Flüssigtreibstoffe an Tankstellen ist keine massgebliche Veränderung ersichtlich. Spezielle Eigenheiten einzelner Treibstoffe wie beispielsweise Ethanol fallen nicht ins Gewicht.
Erdgas/Biogas	Die Anlieferung erfolgt via Rohrleitungsnetz in die Verdichterstation, in der sich auch die Zylinder für die Zwischenspeicherung befinden. Es erfolgt kein Umschlag Fahrzeug – Lagertank. Sämtliche Elemente sind für hohe Drücke ausgelegt und die Speichermengen sind vergleichsweise gering. Insgesamt wird das Risiko eher geringer als bei einer Flüssigtreibstofftankstelle eingestuft. Wird zudem die eher geringe Verbreitung der Tankstellen mit berücksichtigt, ergibt sich kein relevantes Risiko für das Gesamtsystem.
Flüssiggas	Beim Flüssiggas finden Anlieferung und Umschlag via Strasse statt. Die Lagerung erfolgt in unterirdischen und oft oberirdischen Tanks. Gegenüber dem Erdgas sind diese Elemente nachteilig, da sie ein höheres Potential für Fehler und grosse Schadensausmasse im Ereignisfall enthalten (z.B. wenn Tanks nahe einer bebauten Umgebung stehen). Speziell zu erwähnen sind Kompaktanlagen, die je nach Platzierung – in Bezug zu Verkehrsflächen und der bebauten Umgebung – zusätzliches Risikopotential enthalten. Da Flüssiggas weiterhin eher eine geringe Verbreitung hat, ergibt sich trotzdem keine massgebliche Risikoveränderung für das Gesamtsystem.
Wasserstoff	Die bereits bei der Lagerung erwähnten Vorbehalte und Optionen ziehen sich weiter zum Umschlag und Lagerung bei Tankstellen. Für den gasförmigen Wasserstoff gelten vergleichbare Aussagen wie für das Flüssiggas (auch wenn die Gase deutlich unterschiedliche Eigenschaften aufweisen).

5.2.4 Fahrzeugeinsatz

Flüssigtreibstoffe	Die Risiken der Flüssigtreibstoffe sind aus der Erfahrung weitgehend bekannt. Einzelne alternative Flüssigtreibstoffe weisen zwar spezielle Eigenheiten auf, diese fallen jedoch insgesamt wenig ins Gewicht. Aufgrund der zunehmenden Elektrifizierung auch herkömmlicher Fahrzeuge, die mit Flüssigtreibstoffen angetrieben werden, werden elektrische Gefahren auch hier bedeutsam (z.B. Bordnetze mit höherer Spannung).
Erdgas/Biogas	Bei einer weiteren Verbreitung von Erd-/Biogas als Treibstoff ist davon auszugehen, dass die Fahrzeuge zunehmend für den Gasantrieb optimiert werden und dementsprechend auch für Unfälle optimal ausgelegt sind. Umrüstungen, die teilweise aus der Sicht der Karosserieverformung und Gefährdung der Insassen nicht optimal sind, bleiben eine vorübergehende Randerscheinung. Insgesamt ist das Treibstoffsystem so ausgelegt (Widerstandsfähigkeit, Dichtheit), dass mit geringerer Ereignishäufigkeit und Risiko als bei Flüssigtreibstoffen zu rechnen ist.
Flüssiggas	Die Aussagen beim Erdgas gelten in vergleichbarer Form ebenfalls beim Flüssiggas.
Wasserstoff	Abgesehen davon, dass unklar ist, ob bzw. in welchem Umfang im betrachteten Zeithorizont der Wasserstoffantrieb massgeblich zum Einsatz kommt, gelten weitgehend die gleichen Anmerkungen wie für Erdgas.
Elektroantrieb	Das mit dem Elektro-Antrieb verbundene kollektive Personenrisiko wird insgesamt als mit Benzin vergleichbar hoch eingestuft. Die Einschätzung bezieht sich auf in grosser Serie hergestellte Fahrzeuge, bei denen verschiedene heute erkannte Schwachstellen befriedigend technisch gelöst werden. Speziell ist in diesem Zusammenhang auf die Crash-Sicherheit (mechanische Einwirkung), die mögliche Gefährdung bei Unfällen durch hohe Spannungen oder den geräuschlosen Antrieb (Fussgängersicherheit) hinzuweisen. Die Problematik des geräuschlosen Antriebs ist seit kurzem ein Thema und Ansätze werden diskutiert.
Hybridantrieb	In der bisherigen umfangreichen Praxis finden sich keine Hinweise, dass die effektiven Risiken von denjenigen eines reinen Benzinbetriebs massgeblich abweichen. Als spezieller Punkt ist zu erwähnen: Die Fahrzeuge weisen hohe Spannungsniveaus auf, was insbesondere für Einsatzkräfte im Ereignisfall eine Gefährdung bedeuten kann. Zudem ist das Spannungsniveau je nach Hybridart unterschiedlich hoch, was nicht sofort erkennbar ist.

5.3 Risikowahrnehmung

Risiko und dessen Wahrnehmung	Eine möglichst objektive Einschätzung von Risiken ist das Eine – die Wahrnehmung dieser Risiken in der Gesellschaft ist das Andere.
Erwartungshaltung und Risikoaversion	<p>Die Einschätzungen und Abwägung in Kapitel 4 lassen langfristig keine fundamentalen Abweichungen in der Sicherheit gegenüber heute erwarten, sofern – wie angenommen – eine sorgfältige Entwicklung und Problemlösung stattfindet. Trotzdem sind aus dem Blickwinkel der Risikowahrnehmung zwei Aspekte speziell zu beachten:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Die besondere Aufmerksamkeit der Gesellschaft gegenüber neuen Technologien. – Die Wahrnehmung von zwar seltenen Ereignissen, die im Eintretensfall jedoch spektakulär sind oder einen grossen Schaden zur Folge haben.
Unbekanntheit	Die Erwartung an die Sicherheit steigt bei neuen Technologien, mit denen keine persönliche Erfahrung besteht oder gar falsche Assoziationen verbunden werden ("Explosionsgefahr von Gasen"). Treten einzelne solche Ereignisse ein, wird die Skepsis bestätigt. Das Image und damit der Erfolg der Technologie leidet darunter.
Risikoaversion	Betrachtet man historisch die Auswirkungen von grossen Unfällen auf die Gesellschaft oder auf Unternehmen, so zeigt sich, dass Ereignisse mit grossen Schadenfolgen – und damit auch mit einer grossen Signalwirkung – ungleich stärker wahrgenommen werden und stärkere Reaktionen hervorrufen als eine entsprechend grosse Zahl kleiner Unfälle mit insgesamt derselben Anzahl Todesopfer. Das Phänomen ist empirisch feststellbar und theoretisch begründbar (Entscheidungstheorie). In der risikobasierten Sicherheitsplanung wird das Phänomen systematisch mit dem Begriff der Risikoaversion berücksichtigt.
Spezieller Schutz gegenüber Grosseignissen	Grosse Unfälle haben neben direkten Schäden meist auch indirekte Folgen wie Haftungsansprüche oder verschärfte Vorschriften, Imageverluste oder politischen Druck. Solche Schäden lassen sich nie vollständig erfassen und explizit darstellen. Neben der Öffentlichkeit wird sich deshalb auch ein Unternehmen im Allgemeinen stärker gegen solche Ereignisse schützen wollen bzw. müssen. Dies gilt insbesondere im vorliegenden Kontext.
Überproportionale Sicherheitsanstrengungen	Sicherheitsanstrengungen sind daher nicht nur aus einer "objektiven" Sicht zu betreiben, sondern ebenso unter Berücksichtigung der Risikowahrnehmung. Dies rechtfertigt höhere Anstrengungen, als es aus einer rein "objektiven" Sicht angebracht scheint.

6 Folgerungen

Nachfolgend sind wesentliche Folgerungen zu Punkten mit Handlungsbedarf zusammengefasst:

Einsatzkräfte	Die Vielfalt der Treibstoffe und Antriebssysteme wächst. Im Ereignisfall können dadurch je nach Fahrzeug unterschiedliche Gefahren für Personen entstehen (Gas, hohe Spannung), die nicht ohne weiteres erkennbar sind. Sie erschweren eine rasche und adäquate Intervention. Eine standardisierte Kennzeichnung der Fahrzeuge und Handhabung im Ereignisfall sowie eine entsprechende Ausbildung der Einsatzkräfte sind anzustreben.
Spezifische Ereignisabläufe	Die alternativen Antriebe enthalten zahlreiche Vorkehrungen, um die Ereigniswahrscheinlichkeit und die Konsequenzen im Ereignisfall klein zu halten. Beispielsweise wird ein Bersten eines Gastanks bei starker Erhitzung verhindert, indem das Gas durch ein Sicherheitsventil ausbläst. Dies kann zu einem Freistrahbrand führen, der bei einem einzelnen Fahrzeug im Freien unproblematisch ist. Sind mehrere Fahrzeuge beteiligt, oder liegt das Fahrzeug auf der Seite, allenfalls in einem geschlossenen Raum, etc., können die Treibstoff- und Fahrzeugeigenheiten den Ereignisablauf stärker beeinflussen. Dabei stellt sich die Frage, unter welchen Bedingungen welche Szenarien mit welchen Folgen denkbar sind und wie ihnen zu begegnen ist. Eine vertiefte Untersuchung dieses Themenfeldes erscheint sinnvoll.
Regelungen zum Transport	Das Übereinkommen über die Internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Strasse (ADR) deckt den Transport der absehbaren alternativen Treibstoffe ab und es besteht aus dieser Sicht kein Handlungsbedarf.
Stationäre Anlagen	Oberirdische Gastanks nahe an besiedelter Umgebung und allenfalls im Bereich von Verkehrsflächen (z.B. Flüssiggas-Kompakt-Tankstellen) enthalten das Potential für schwere Schädigungen. Unterirdische Tanks entschärfen das Problem. Fallen entsprechende Anlagen aufgrund ihrer besonderen Grösse unter die Störfallverordnung, so ist ein Kontrollprozedere, das auf potentiell schwere Schadenereignisse fokussiert, sichergestellt. Kleinere Tanks sollten ein vergleichbares Augenmerk erhalten.
Einzel- und Sonderlösungen	Neue Technologien in grosser Serie und von namhaften Herstellern kommen nur dann auf den Markt, wenn sie mindestens das gleiche Sicherheitsniveau wie bestehende Technologien erreichen. Dies ist bedingt durch die hohe Regelungsdichte, die Produkthaftung und das Bestreben nach einem "tadellosen" Image von grossen Herstellern. Dieser Mechanismus kann bei Einzel- oder Sonderlösungen versagen. Ein spezielles Augenmerk

ist daher auf entsprechende Entwicklungen zu legen, auch wenn die Lösungen im Einzelfall durchaus den Regeln der Technik entsprechen (siehe auch Anmerkungen zu Umrüstungen, Tuning).

- | | |
|--|---|
| Umrüstungen | Die Umrüstung von Fahrzeugen ist eine vorübergehende Nische und bei Erdgas/Flüssiggas etabliert. Trotz ausgereifter Technologie können solche Fahrzeuge letztlich nicht das gleiche Sicherheitsniveau bieten, wie ein von Grund auf für einen bestimmten Einsatz konzipiertes Fahrzeug (z.B. Gas-tank im Verformungsbereich der Karosserie). |
| Tuning bei Hybrid- oder Elektroantrieben | Reichweitenverlängerung oder Leistungssteigerung durch den Austausch von Batterien und Eingriffen in den Antrieb sind beim Elektroantrieb möglich. Erste Ansätze sind auf dem Fahrzeugmarkt sichtbar. Dies wird nicht ohne Einfluss auf die Sicherheit des Antriebssystems sein. Es ist daher angebracht, entsprechende Veränderungen an Fahrzeugen zu regeln. |
| Regelungen und Standards | Da die Entwicklungsdynamik sehr hoch ist, besteht einerseits die Gefahr, dass Regelungen "hinten nach hinken" oder die bisherigen und weiterhin angewandten Regeln zu wenig auf spezifische Gefahren eingehen (beispielsweise Freisetzung von gesundheitsgefährdenden Stoffen oder Crashsicherheit bei Elektrofahrzeugen [Stepken 2009]). Der Handlungsspielraum der Schweiz ist allerdings in vielen dieser Bereiche eingeschränkt, da die Standards international ausgearbeitet werden. |
| Komplexität und Unterhaltsbetriebe | Die bei den Einsatzkräften angesprochene Problematik der Vielfalt der Treibstoffe und Komplexität der Antriebe stellt ebenfalls spezielle Anforderungen an Garagenbetriebe. Die Aus- und Weiterbildung in diesen Belangen sowie die Befähigung für Arbeiten und Reparaturen an Fahrzeuge müssen sichergestellt sein. |

7 Literatur

- [AFM+E 2007] Aussenhandelsverband für Mineralöl und Energie e. V. AFM+E, UNITI Bundesverband mittelständischer Mineralölunternehmen e. V., Verband gewerblicher Tanklagerbetriebe e. V. (2007): Mineralöl und Energie - handeln, lagern, liefern. Jahresbericht 2006. 81 S.
- [AG F-T 1992] Arbeitsgruppe Flüssiggas-Tankanlagen (1992): Rahmenbericht Flüssiggas-Tankanlagen zum Kurzbericht und zur Risikoermittlung im Hinblick auf die Störfallvorsorge. Basler&Hofmann, Zürich.
- [ASTRA 2006] Bundesamt für Strassen (ASTRA, 2006): Handbuch eNistra, Handbuch für die Version eNISTRA 2006.1 Ecoplan, Endversion vom 27. Juni 2006.
- [BAFU 2007] Bundesamt für Umwelt BAFU (2007): Wirtschaftlichkeit von Schutzmassnahmen gegen Naturgefahren – EconoMe 1.0. Glossar.
- [BBl 2006] Bundesblatt 06.035 (2006): Botschaft zur Änderung des Mineralölsteuergesetzes vom 3. Mai 2006. S. 4259-4288
- [BFE 2007a] Bundesamt für Energie BFE (2007): Ökologische Bewertung von Biotreibstoffen.
- [BFE 2007b] Bundesamt für Energie BFE (2007): Die Energieperspektiven 2035 – Band 1 Synthese.
- [BFE/BAFU/BLW 2007] Bundesamt für Energie, Bundesamt für Umwelt, Bundesamt für Landwirtschaft (Hrsg., 2007): Ökobilanz von Energieprodukten: Ökologische Bewertung von Biotreibstoffen. Schlussbericht.
- [BFE/Infras 2007] BFE/Infras (2007): Der Energieverbrauch des Verkehrs 1990-2035. Ergebnisse der Szenarien I bis IV und der zugehörigen Sensitivitäten "BIP hoch", "Preise hoch" und "Klima wärmer".
- [BFS 2008] Bundesamt für Statistik BFS (2008)
- [BFU 2005] Beratungsstelle für Unfallverhütung bfu (2005): Unfallgeschehen in der Schweiz. bfu-Statistik 2006. Fahrleistung in

Mio. Fahrzeugkilometer nach Ortslage, 1970 – 2005 (USV.T.07)

- [BFU 2007] Beratungsstelle für Unfallverhütung bfu (2007): Volkswirtschaftliche Kosten der Nichtberufsunfälle in der Schweiz. Strassenverkehr, Sport, Haus und Freizeit. bfu-Report Nr. 58. Bern. 183 S.
- [Bonomi 2006] Bonomi D. et al, 2006: Mengenschwellen gemäss Störfallverordnung (StFV). Liste mit Stoffen und Zubereitungen. Umwelt-Vollzug Nr. 0611. Bundesamt für Umwelt, Bern. 56 S.
- [Brück 2007] Brück, E.P.A. (2007): Vorsicht bei Planung und Bau der Flüssiggas- und Bioethanol-Betankung an öffentlichen Tankstellen. UNITI Bundesverband mittelständischer Mineralölunternehmen e.V. mineralölrundschau 07/2007, S. 21-23.
- [Burgherr 2005] Burgherr, P., Hirschberg, S. (2005): Comparative assessment of natural gas accident risks. PSI-Bericht Nr. 05-01. Villigen PSI: Paul Scherrer Institut.
- [BUWAL 1996] Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL (1996): Methodikbeispiel für eine Risikoermittlung einer Flüssiggas-Tankanlage (Störfallverordnung). 62 S.
- [BUWAL 1998] Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL (1998): Pilotrisikoanalyse für den Transport gefährlicher Güter, Fallbeispiel Bahn.
- [BUWAL 1999] Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL (1999): Pilotrisikoanalyse für den Transport gefährlicher Güter, Fallbeispiel Autobahn.
- [CARBURA 2005] CARBURA (2005): Rahmenbericht über die Sicherheit von Stehtankanlagen für flüssige Treib- und Brennstoffe. Revidierte Ausgabe 2005. CARBURA Schweizerische Zentralstelle für die Einfuhr flüssiger Treib- und Brennstoffe, in Zusammenarbeit mit dem BUWAL Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft.
- [CARBURA 2006] CARBURA (2006): Geschäftsbericht 2005. www.carbura.ch
- [CARBURA 2007] CARBURA (2007): Geschäftsbericht 2006.
- [Chamberlain 2002] Chamberlain, S.; Modarres, M.; Mowrer, F. (2002): Compressed Natural Gas Bus Safety: A Qualitative and

Quantitative Risk Assessment.

<http://www.enre.umd.edu/ctrs/report.pdf>.

- [CONCAWE, EC, EUCAR 2007] CONCAWE, European Commission, European Council for Automotive R&D (2007): Well-to-Wheels Analysis of Future Automotive Fuels and Powertrains in the European context. 88 S.
- [D VW 2007] Deutscher Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Verband (2007): Wasserstoff – der neue Energieträger. Eine fachliche Einführung vom Deutschen Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Verband e.V. http://www.dvw-info.de/publikationen/-2006/pm_04tcb.pdf
- [EC 2006] European Commission (2006): Biofuels in the European Union. A vision for 2030 and beyond. Final report of the Biofuels Research Advisory council.
- [EKAS 2005] Eidgenössische Koordinationskommission für Arbeitssicherheit (2005): Richtlinie Nr. 1941, Flüssiggas, Teil 1: Behälter, Lagern, Umschlagen und Abfüllen.
- [EnergieSchweiz 2007] EnergieSchweiz (2007): Energieeffizienz-Strategie für eine nachhaltige Energiezukunft. Entwurf vom 22.1.2007.
- [Erdöl-Vereinigung 2006] Erdöl-Vereinigung (2006): Jahresbericht 2005.
- [GDV 1994] Gesamtverband der deutschen Versicherungswirtschaft (1994): Untersuchung zu Fahrzeugbränden. Zitiert nach: Allianz Zentrum für Technik
- [Gmünder 2006] Gmünder, F. (2006): Fallstudie QRA von LPG-Tankanlagen, Folien zu Vortrag an der ETHZ.
- [HSE 2006] Health and Safety Executive HSE (2006): Buncefield Investigation Website. www.buncefieldinvestigation.gov.uk
- [INERIS 1996] INERIS (1996): Retour d'expérience, Les Accidents dans les Dépôts d'hydrocarbures, Journée professionnelle, Lyon. Zitiert nach CARBURA (2005).
- [SBB 2006] SBB (2006): Statistisches Vademecum. Die SBB in Zahlen 2005. Beilage zum Geschäftsbericht 2005, SBB AG - Kommunikation, Bern. 32 S.
- [SATW 2007] Schweizerische Akademie der Technischen Wissenschaften (2007): Road Map Erneuerbare Energien Schweiz. Eine Ana-

lyse zur Erschliessung der Potenziale bis 2050.
www.satw.ch

- [scnat/SATW 2007] Akademie der Naturwissenschaften, Schweizerische Akademie der Technischen Wissenschaften (2007b): Energieressourcen: Zahlen und Fakten. Nutzung, Potentiale und Risiken verschiedener Energieressourcen in der Schweiz.
- [Schweizerische Erdgaswirtschaft 1997] Schweizerische Erdgaswirtschaft (1997): Sicherheit von Erdgas-Hochdruckanlagen. Rahmenbericht. Revidierte Ausgabe.
- [Schulz 2007] Schulz, T. F. (2007): Intermediate Steps Towards the 2000-Watt Society in Switzerland: an Energy-Economic Scenario Analysis. Eidgenössische Technische Hochschule ETH Zürich, Diss. Nr. 17314.
- [Spörner 2001] GDV, Institut für Fahrzeugsicherheit München: Fahrzeugbrände aus Sicht der Unfallforschung der deutschen Autoversicherer, 2001
- [Stepken 2009] Stepken, A.
TÜV SÜD fordert einheitliche Standards bei Elektroautos
Pressekonferenz, 16.09.2009
- [TCS 2002] Touring Club Schweiz TCS (2002): ADAC, ÖAMTC und TCS-Symposium zum Thema "Fahrzeugbrand" in Bregenz. Pressemitteilung vom 24.04.2002.
- [TNO 1991] TNO (1991): Auszug aus Datenbank FACTS über Störfälle (unveröffentlicht). Zitiert nach CARBURA (2005).
- [VSG 2007] Verband der Schweizerischen Gasindustrie VSG (2007): Hauptnetz der Schweizerischen Erdgasversorgung.
www.erdgas.ch

A1 Faktenblätter Treibstoffe

Benzin
<p>Chemische und physikalische Eigenschaften</p> <ul style="list-style-type: none"> – Chemische Zusammensetzung: Kohlenwasserstoffe (5 bis 11 Kohlenstoffatome), verschiedene Ether, höhere Alkohole, Phenole, Komplexbildner und Amine. – Spezifische Wärme: 32 MJ/l – Dichte (288K): 0.72 – 0.78 kg/l – Flammpunkt: < -20 °C – Zündtemperatur ca. 220 °C – Explosionsgrenze 0.6 – 8 Vol.-% – Farblose, phenolartig riechende Flüssigkeit
<p>Herstellungsprozesse</p> <ul style="list-style-type: none"> – Fraktionierte Destillation und Cracken von Erdöl in Raffinerien – Auf der Basis von Kohle durch Kohleverflüssigung – Benzinarten in der Schweiz: Bleifrei 95 (ROZ 95), Bleifrei 98 (ROZ 98.), Shell Optimax (ROZ 99), V-Power (ROZ 100), Flugbenzin (bleihaltig ROZ 100, ROZ 130).
<p>Verbrauch 2005</p> <ul style="list-style-type: none"> – 3.6 Mio. Tonnen Benzin im Strassenverkehr
<p>Distribution</p> <ul style="list-style-type: none"> – Per Schiff, Pipeline, Schiene in die Schweiz und in Inlanddepots. Weitertransport per Schiene oder Lkw. – Raffinerie Collombey (VS): Belieferung mit Rohöl per Pipeline aus Genua, Auslieferung per Pipeline in benachbarte Tanklager, Eisenbahn und LKW – Raffinerie Cressier (NE): Belieferung mit Rohöl per Pipeline aus Fos-sur-Mer (Südfrankreich). Auslieferung per Eisenbahn und LKW.
<p>Lagerung</p> <ul style="list-style-type: none"> – Stehtankanlagen
<p>Sicherheitsrelevante Eigenschaften</p> <ul style="list-style-type: none"> – Gefahrenkennzahl: 33 – Wassergefährdung: WGK 3 (stark wassergefährdend) – Hochentzündlich – Explosionsgefahr – Dämpfe schwerer als Luft, können sich in Bodennähe ansammeln. – Gesundheitsschäden bei längerer Exposition durch Einatmen, Berührung mit der Haut und durch Verschlucken. – Umweltschäden: Trinkwassergefährdung beim Eindringen grösserer Mengen in Untergrund und Gewässer möglich

Diesel

Chemische und physikalische Eigenschaften

- Chemische Zusammensetzung: Alkane, Cycloalkane und aromatische Kohlenwasserstoffe mit etwa 10 bis 22 Kohlenstoff-Atomen pro Molekül.
- Spezifische Wärme: 35.3 MJ/l
- Dichte (288K): 0.820 – 0.86 kg/l
- Flammpunkt: > 55 °C
- Zündtemperatur: ca. 220 °C
- Explosionsgrenzen: 0.6 – 6.5 Vol.-%
- Praktisch nicht wasserlöslich

Herstellungsprozesse

- Dieseltreibstoff wird durch Destillation von Rohöl in Raffinerien gewonnen

Verbrauch 2005

- 1.7 Mio. Tonnen
- 30% der im Jahr 2006 verkauften PW sind Diesel-PW, mit weiter steigender Tendenz. Der Diesel-Absatz betrug in der Schweiz 2006 1.85 Mio. t.

Distribution

- wie Benzin

Lagerung

- Stehtankanlagen

Sicherheitsrelevante Eigenschaften

- Gefahrenkennzahl: 30
- Wassergefährdung: WGK 2 (wassergefährdend)
- Brand- und Explosionsgefahr etwas geringer als bei Benzin.
- Dämpfe schwerer als Luft, können sich in Bodennähe ansammeln.
- Gesundheitsschäden bei längerer Exposition durch Einatmen, Berührung mit der Haut und durch Verschlucken.
- Umweltschäden: Trinkwassergefährdung beim Eindringen grösserer Mengen in Untergrund und Gewässer möglich

Biodiesel

Chemische und physikalische Eigenschaften

- Chemische Zusammensetzung: C16-18- und C18-ungesättigte Fettsäuremethylester
- Spezifische Wärme: 35.2 MJ/l
- Dichte (288K): 0.875 – 0.885 kg/l
- Flammpunkt: 180 °C
- Zündtemperatur: ca. 250 °C
- Explosionsgrenze: n.b.
- Praktisch nicht wasserlöslich

Herstellungsprozesse

- Veresterung von Pflanzenöl mit Methanol (Umesterung). Abtrennung von Glycerin.
- Fettsäure-Methylester (FAME), Rapsölmethylester (RME) oder pflanzlichem Methylester (PME).
- Biodieselprodukte: Diesel mit 5% Biodieselanteil (B5) und reiner Biodiesel (B100).

Verbrauch 2005

- Rund 3'000 Tonnen (an ca. 220 Tankstellen)

Distribution

- Per LKW (als B100 oder B5)

Lagerung

- Derzeit keine bedeutenden Lagermengen.

Sicherheitsrelevante Eigenschaften

- Keine Gefahrenkennzahl
- Wassergefährdung: WGK 1 (schwach wassergefährdend)
- Schwer entflammbar
- Gesundheitsschäden: Keine spezifischen Wirkungen bekannt.
- Umweltschäden: Trinkwassergefährdung nur bei Eindringen grosser Mengen in Untergrund und Gewässer.

Pflanzenöl

Chemische und physikalische Eigenschaften

- Chemische Zusammensetzung: Ester langkettiger Fettsäuren (keine Kohlenwasserstoffe)
- Spezifische Wärme: 37 MJ/kg
- Dichte (293K): 0.92 kg/l
- Flammpunkt (Rapsöl): 230°C
- Zündtemperatur: n.b.
- Flüssigkeit mit hoher Viskosität

Herstellungsprozesse

- Pressverfahren: Ölpressung, Ölreinigung, Vergällung
- Extraktionsverfahren: Extraktion von Schleimstoffen und Abtrennung von Wasser
- Zentrifugation

Verbrauch 2005

- Derzeit kein bedeutender Verbrauch im Strassenverkehr

Distribution

- Als Treibstoff in Lagergebinden mit LKW

Lagerung

- Derzeit keine bedeutenden Lagermengen

Sicherheitsrelevante Eigenschaften

- Keine Gefahrenkennzahl
- Keine Wassergefährdungsklasse
- Schwer entflammbar
- Gesundheitsschäden: Keine spezifischen Wirkungen bekannt.
- Umweltschäden: Trinkwassergefährdung nur bei Eindringen grosser Mengen in Untergrund und Gewässer.

Ethanol

Chemische und physikalische Eigenschaften

- Chemische Zusammensetzung: C_2H_5OH
- Spezifische Wärme: 21 MJ/l
- Dichte (293K): 0.7894 kg/l
- Flammpunkt: 17 °C
- Zündtemperatur: 425 °C
- Explosionsgrenze: 3.5 – 15 Vol.-%
- Dampfdruckanomalie bei Mischungen von Ethanol in Benzin, so dass Höchstwerte der Luftreinhalteverordnung (LRV) überschritten werden können.
- Vollständig mit Wasser mischbare Flüssigkeit

Herstellungsprozesse

- Raffination von Biomasse, Umwandlung in Flüssigkeiten, Hydrolyse von Stärke zu Traubenzucker, Fermentation, Destillation, Dehydrierung und wahlweise Denaturierung.
- Alkoholische Vergärung von Biomasse (Agrar- oder Bioethanol)
- Gebräuchliche Mischungen von Ethanol und Benzin: E5, E85, E100

Verbrauch 2005

- Ca. 700 t Bioethanol (2006: ca. 2'500 t)

Distribution

- Per Lkw

Lagerung

- Derzeit keine bedeutenden Lagermengen

Sicherheitsrelevante Eigenschaften

- Gefahrenkennzahl: 30/33
- Wassergefährdung: WGK 1 (schwach wassergefährdend)
- Hochentzündlich
- Explosionsgefahr
- Dämpfe schwerer als Luft, können sich in Bodennähe ansammeln
- Dampfdruckanomalie: leichtere Bildung von zündfähigen Dämpfen
- Gesundheitsschäden: Giftig bei Einatmen, Berührung und Verschlucken, Reizwirkung am Auge, Befindstörungen, durch hohe Dosen Schädigung verschiedener Organe, insbesondere der Leber
- Umweltschäden: Trinkwassergefährdung nur bei Eindringen sehr grosser Mengen in Untergrund und Gewässer möglich.

Flüssiggas

Chemische und physikalische Eigenschaften

Eigenschaften für Propan (meist Hauptbestandteil)

- Chemische Zusammensetzung: Propan C_3H_8
- Spezifische Wärme: 14 kWh/kg
- Dichte (273K): 1.83 kg/m³ (Propan) bzw. flüssige Phase am Siedepunkt: 0.5812 kg/l
- Flammpunkt: -104°C (Propan)
- Zündtemperatur: 470 °C
- Explosionsgrenze: 2 – 11.7 Vol.-%
- Dampfdichteverhältnis (Luft=1): 1.56 (Gas schwerer als Luft)
- Kritische Temperatur: ca. 97°C
- Kritischer Druck: 42 bar

Herstellungsprozesse

- Gewinnung bei der Rohölförderung und beim Raffinieren des Öls.
- Gewinnung aus Kondensat bei der Gasförderung

Verbrauch 2005

- ca. 523 t für den Verkehr

Distribution

- Per Schiene und Lkw in Tanks und/oder Flaschen

Lagerung

- Vergleichsweise geringe Lagerhaltung in Tanks oder Flaschen unterschiedlicher Grösse

Sicherheitsrelevante Eigenschaften

- Gefahrenkennzahl: 23
- Keine Wassergefährdung
- Hochentzündlich
- Explosionsgefahr
- Gas schwerer als Luft, kann sich in Bodennähe ansammeln
- Gesundheitsschäden: Kälteschäden nach Hautkontakt mit entspannter Flüssigkeit, zentralnervöse Störungen, im Extremfall Erstickung durch Sauerstoffmangel.
- Umweltschäden: Eine Trinkwassergefährdung bei Eindringen in Untergrund und Gewässer ist nicht zu befürchten.

Methan (Biogas, Erdgas, synth. Erdgas [SNG])

Chemische und physikalische Eigenschaften

- Chemische Zusammensetzung: Methan, Kohlenstoffdioxid (Erdgas: zusätzlich Ethan, Propan, Butan und Ethen)
- Spezifische Wärme: 36 - 50 MJ/kg
- Dichte (273K): 0.7175 kg/m³, flüssige Phase am Siedepunkt: 0.4226 kg/l
- Flammpunkt: -188°C
- Zündtemperatur: 595 °C
- Explosionsgrenzen: 4.4 – 17 Vol.-%
- Dampfdichteverhältnis (Luft=1): 0.55 (Gas leichter als Luft)
- Kritische Temperatur: -82 °C
- Kritischer Druck: 46 bar

Herstellungsprozesse

- Biogas: anaerobe Vergärung von organischem Material (Hydrolyse, Acidogenese, Acetogenese und Methanogenese)
- Erdgas: fossile Primärenergiequelle wird direkt gefördert
- Synthetisches Erdgas: thermische Vergasung von Biomasse und katalytische Methanierung des Synthesegases.

Verbrauch 2005

- Ca. 3'350 t Biogas und ca. 5'700 t Erdgas für den Verkehr
- Erdgas wird in flüssiger Form als LNG (Liquified Natural Gas) oder unter Druck von ca. 250 bar als CNG (Compressed Natural Gas) als Kraftstoff im Auto eingesetzt.

Distribution

- Per Gasleitungsnetz (von Hochdruck-Transportleitungen über Druckreduzierstationen und Entspannungsanlagen in lokale Niederdruck-Verteilnetze)

Lagerung

- Keine Zwischenlagerung

Sicherheitsrelevante Eigenschaften

- Gefahrenkennzahl: 23 (Methan)
- Wassergefährdung (Methan): WGK 0 (nicht wassergefährdend)
- Gesundheitsschäden: Erfrierungen bei Hautkontakt mit der unterkühlten Flüssigkeit, narkotisierende Wirkung nur bei Druckinhalation, Tod durch Erstickern bei Sauerstoffverdrängung.
- Umweltschäden: keine direkten, Treibhausgas

Synthetische Treibstoffe (BTL, CTL, GTL)

Chemische und physikalische Eigenschaften

- Chemische Zusammensetzung: n.b. (unterschiedlich)
- Spezifische Wärme: n.b. (unterschiedlich)
- Dichte (293K): n.b. (unterschiedlich)
- Flammpunkt: n.b. (unterschiedlich)
- Zündtemperatur: n.b. (unterschiedlich)
- Synthetische Kraftstoffe haben eine niedrigere Viskosität und eine höhere Cetanzahl als Diesel
- Farb- und geruchlose Flüssigkeit ist völlig schwefelfrei und enthält weder aromatische Verbindungen noch organischen Stickstoff

Herstellungsprozesse

- Thermische Vergasung des Biomasse (BTL) oder Kohle (CTL), Umwandlung des Synthesegases oder Erdgases (GTL) in Flüssigtreibstoff mit Fischer-Tropsch-Synthese
- Rohstoff: feste Biomasse (BTL), Kohle (CTL), Erdgas (GTL)

Verbrauch 2005

- Noch kein Einsatz im Strassenverkehr

Distribution

- Noch keine

Lagerung

- Noch keine

Sicherheitsrelevante Eigenschaften

Mit Diesel vergleichbar einzustufen

- Gefahrenkennzahl: n.b.
- Wassergefährdung: n.b.
- Brand- und Explosionsgefahr etwas geringer als bei Benzin.
- Dämpfe schwerer als Luft, können sich in Bodennähe ansammeln.
- Gesundheitsschäden bei längerer Exposition durch Einatmen, Berührung mit der Haut und durch Verschlucken.
- Trinkwassergefährdung beim Eindringen grösserer Mengen in Untergrund und Gewässer möglich

Methanol

Zusammenfassung

- Methanol weist gegenüber Erdgas den Vorteil auf, dass es als Flüssigkeit gut speicherfähig und transportabel ist. Folgende Vorteile würde Methanol als Kraftstoff aufweisen:
- Es kann preiswert aus Erdgas oder Kohle hergestellt werden.
- Es ließen sich Motoren bauen, die einen um 30 % höheren Wirkungsgrad gegenüber Benzinmotoren aufweisen.
- Die Umwelteigenschaften sowohl des Kraftstoffes als auch der Verbrennungsprodukte wären besser als beim Benzin.

Chemische und physikalische Eigenschaften

- Chemische Zusammensetzung: CH_3OH (CH_4O)
- Spezifische Wärme: 19.7 MJ/kg
- Dichte (293K): 0.78 kg/l
- Flammpunkt: 11 °C
- Zündtemperatur: 455 °C
- Explosionsgrenzen: 5.5 – 36.5 Vol. %

Herstellungsprozesse

- Herstellung grosstechnisch aus Synthesegas, Nebenprodukte Ethanol und Dimethylether.

Verbrauch 2005

- Geringe Mengen als Zusatz in Vergaserkraftstoffen

Distribution

- V.a. als Zusatz in anderen Treibstoffen

Lagerung

- Bisher keine bedeutenden Lagermengen

Sicherheitsrelevante Eigenschaften

- Gefahrenkennzahl: 336
- Wassergefährdung: WGK 1 (schwach wassergefährdend)
- Hochentzündlich
- Explosionsgefahr
- Dämpfe schwerer als Luft, können sich in Bodennähe ansammeln.
- Gesundheitsschäden: giftig, entfettende und reizende Wirkung auf die Haut, Lungenschädigung bei Inhalation höherkonzentrierter Aerosole, Depression des Zentralnervensystems
- Umweltschäden: Trinkwassergefährdung beim Eindringen in Untergrund und Gewässer möglich

Ethyl-Tertiär-Butyl-Ether (ETBE)

Chemische und physikalische Eigenschaften

- Chemische Zusammensetzung: $C_6H_{14}O$
- Spezifische Wärme: J/gK
- Dichte (293K): 0.74 kg/l
- Flammpunkt: $<0\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Zündtemperatur $> 300\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Explosionsgrenze: 0.6-8 Vol. %
- farblose Flüssigkeit mit starkem Terpentingeruch und Geschmack

Herstellungsprozesse

- Veresterung von Ethanol mit Isobuten.

Verbrauch 2005

- Geringe Mengen als Zusatz in Vergaserkraftstoffen

Distribution

- V.a. als Zusatz in anderen Treibstoffen

Lagerung

- Bisher keine bedeutenden Lagermengen

Sicherheitsrelevante Eigenschaften

- Gefahrenkennzahl: 33/30
- Wassergefährdung: WGK 1
- Brand- und Explosionsgefahr etwas geringer als bei Benzin.
- Dämpfe schwerer als Luft, können sich in Bodennähe ansammeln.
- Gesundheitsschäden: Dämpfe können Reizungen der Augen, Nase und des Rachens verursachen sowie eine depressorische Wirkung auf das Zentralnervensystem
- Umweltschäden: ETBE (und MTBE) können aufgrund ihrer Persistenz Grundwasser gefährden

Dimethylether (DME)

Chemische und physikalische Eigenschaften

- Chemische Zusammensetzung: Ether mit 2 Methylgruppen als organische Reste, C_2H_6O
- Spezifische Wärme: J/gK
- Dichte (293K): 1.97 g/l (bei 15°C/1 bar)
- Explosionsgrenzen [Vol.% in Luft] : 2.7 bis 32
- Zündtemperatur : 235 °C
- Flammpunkt:
- Dampfdichteverhältnis (Luft=1): 1.63 (Gas schwerer als Luft)
- Kritische Temperatur: 235 °C
- Kritischer Druck: 53.7 bar
- farbloses, leicht narkotisierend wirkendes, ungiftiges, leichtentzündliches Gas

Herstellungsprozesse

- Aus Synthesegas unter Umgehung der Zwischenstufe Methanol.

Verbrauch 2005

- Kein Einsatz im Strassenverkehr

Distribution

- Zukünftig vergleichbar mit Flüssiggas

Lagerung

- Bisher keine bedeutenden Lagermengen

Sicherheitsrelevante Eigenschaften

- Gefahrenkennzahl: 23
- Wassergefährdung: WGK 1 (schwach wassergefährdend)
- Hochentzündlich
- Explosionsgefahr
- Gas ist schwerer als Luft, kann sich in Bodennähe ansammeln
- Gesundheitsgefährdung: narkotische Wirkung, Kälteschäden nach Hautkontakt mit Flüssigkeit, Reizung von Augen und Atemwegen, im Extremfall Erstickung durch Sauerstoffmangel.
- Umweltschäden: Trinkwassergefährdung beim Eindringen in Untergrund und Gewässer möglich

Wasserstoff

Chemische und physikalische Eigenschaften

- Chemische Zusammensetzung: H₂
- Spezifische Wärme: 14.304 J/gK
- Dichte (273K): 0.0899 kg/m³, flüssige Phase am Siedepunkt: 0.0708 kg/l
- Flammpunkt: -240 °C
- Zündtemperatur: 560 °C (sehr geringe Mindestzündenergie)
- Explosionsgrenzen: 4.0 – 75.6 Vol.-%
- Dampfdichteverhältnis (Luft=1): 0.07 (Gas leichter als Luft)
- Kritische Temperatur: -240 °C
- Kritischer Druck: 13 bar

Herstellungsprozesse

- Elektrolytisch: Aufspaltung von Wasser in Sauer- und Wasserstoff
- Thermochemisch: über einen karbo-thermischen Zinkoxid-Zink-Zyklus durch Zugabe von Kohle oder Koks
- Chemische Reformierung: H₂ aus fossilen Quellen und Biomasse gewonnen

Verbrauch 2005

- Kein Einsatz im Strassenverkehr

Distribution

- Zukünftig per LKW, Bahn oder Versorgungsnetz (vgl. Gasnetz), oder Produktion dezentral am Einsatzort

Lagerung

- Bisher keine bedeutenden Lagermengen, zukünftig in Tanks, möglichst geringe Lagerhaltung aufgrund Lagerverluste oder hohem Energiebedarf für Kühlung
- Mögliche zukünftige Speicherformen: Druckbehälter (ähnlich wie Erdgas-Tanks), Speicher für tiefkalten flüssigen Wasserstoff (Kryospeicher), Speicherung in Metallhydriden, in chemischen Verbindungen oder in Kohlenstoff-Nano-Fasern

Sicherheitsrelevante Eigenschaften

- Gefahrenzahl: 23
- Wassergefährdung: WGK 0 (nicht wassergefährdend)
- Hochentzündlich
- Explosionsgefahr v.a. in geschlossenen Räumen
- Gas deutlich leichter als Luft, daher schnelle Verflüchtigung im Freien, keine Ansammlung des Gases in Bodennähe
- Umweltschäden: sind aufgrund Verflüchtigung nicht zu erwarten
- Gesundheitsschäden: Bei sehr hohen Gaskonzentrationen erstickende Wirkung durch Verdrängung von Luftsauerstoff (Asphyxie), Flüssiger Wasserstoff ist extrem kalt und kann zu schweren Verbrennungen bei direktem Kontakt führen.

A2 Faktenblätter Antriebe

Benzin- und Diesel-Fahrzeuge

Sicherheitsrelevante Eigenschaften

- Ausgereifte und praxiserprobte Technik, hoher Stand der Technik
- Karosserien und Ausstattungen sind crashoptimiert (hohe passive Sicherheit; allgemeine, nicht antriebs-spezifische Eigenschaft)

Entwicklungen bzgl. Verbreitung und Sicherheit

- Technische Verbesserungen / Weiterentwicklungen führen zu leistungsstärkeren, saubereren und energieeffizienteren Verbrennungsmotoren.
- Zunehmende Elektrifizierung führt z.T. zu höheren elektrischen Spannungen an Bord (allgemeine, nicht antriebs-spezifische Entwicklung)
- Zunehmende Entwicklung im Bereich der aktiven Sicherheit (Antriebs-Schlupf-Regelungen (ASR), Bremsassistenten (BAS) und elektronische Stabilitätsprogramme (ESP), Aktive Gefahrenbremsung, Integrierte Querführung etc.) → allgemeine, nicht antriebs-spezifische Entwicklung

Elektro-Fahrzeuge

Sicherheitsrelevante Eigenschaften

- Elektrospeicher (Akkumulator):
 - NiCd-Akkus: Kalilauge als Elektrolyt: Verätzungsgefahr (pH 13.5); giftiges Schwermetall Cadmium
 - Nickel-Metallhydrid-Akkumulatoren (Ni-MH): Kalilauge als Elektrolyt: Verätzungsgefahr (pH 13.5)
 - Lithium-Ionen-Akkumulatoren (Li-Ion): Geringeres Gewicht, hohes Speicherpotential. Im Hinblick auf die Sicherheit bestehen verschiedene Herausforderungen: Schutz vor mechanische Beschädigung, Brennbarkeit, Reaktion mit Wasser, thermische Belastung / Überlastung mit Kurzschluss als Folge.
 - In Verbindung mit (Lösch-)Wasser mögliche Freisetzung von Fluor-Wasserstoffsäure.
 - Doppelschicht-Kondensatoren (Goldcaps, Supercaps, BoostCaps oder Ultracaps)
- Individuelle Stromversorgung: E-Mobile werden z.B. nachts im Niedertarif an normaler Steckdose geladen.
- Über Aufwärtswandler wird die Spannung des Akkus (im Bereich 200-250 V) bis auf 600-700 V erhöht.
- Bei Überhitzung/Brand/Explosion Freisetzung von giftigen Verbrennungsprodukten möglich (CO, CO₂, SO_x, C_xH_x, alkalische Dämpfe, etc.)
- Sicherheitsvorkehrungen (entsprechend Elektroantrieb in Hybridfahrzeugen):
 - Hochspannungssicherung: Kurzschluss-Schutz in der Batterie
 - Relais: Hochspannungskabel über 12-Volt-Relais kontrolliert. Wird Motor abgestellt, verhindert Relais den Stromfluss ausserhalb Batterie. Hochspannungssystem kann einige Minuten nach Abstellen des Motors unter Spannung stehen. In dieser Zeit ist der Kontakt von Hochspannungskomponenten gefährlich.
 - Schmelzsicherung: Bei Kurzschluss führt eine Schmelzsicherung zum Stromunterbruch.
 - Separate Aufprall-Sensoren (wie für Airbags) sorgen bei Unfall dafür, dass Stromfluss unterbrochen wird.
 - Akkumulatoren werden von Diagnosesystem überwacht, das Spannung und Ladezustand jeder einzelnen Zelle, den Strom in der Batterie sowie Temperaturen an vielen Stellen innerhalb der Batterie misst. Bei Fehlfunktion wird die Leistung entsprechend reduziert bzw. die Batterie wird abgeschaltet.
 - Leitungen von der Batterie zum Motor sind gut geschützt in den Fahrzeugunterboden integriert.

Entwicklungen bzgl. Verbreitung und Sicherheit

- Zentraler Punkt: Entwicklung der Akkumulatoren
- Grosser Entwicklungsaufwand im Gange. Jedoch wesentliche Punkte noch nicht befriedigend gelöst: Gewicht, Reichweite, etc.
- Prognosen für die Verbreitung sind stark streuend

Brennstoffzellen-Fahrzeuge

Sicherheitsrelevante Eigenschaften

- Erfahrungen mit Prototypen
 - Speicherformen
 - Speicherung in flüssiger Form, nicht mit längeren Stillständen vereinbar, da der Wasserstoff auf -253 °C gekühlt werden muss.
 - Druckspeicherung bei bis zu 700 bar
- Weitere Eigenschaften unter "Wasserstoff-Fahrzeuge".
- Verwendung von elektrischen Energiespeichern, um die Leistungseinschränkungen der Brennstoffzellen während des Warmlaufvorgangs zu kompensieren
 - Antrieb über Elektromotor mit hohen Spannungen

Entwicklungen bzgl. Verbreitung und Sicherheit

- Probleme bei der Speicherung und in der emissionsarmen Wasserstoff-Produktion sind bisher ungelöst und stehen einem breiten Einsatz entgegen
- Grössere Innovationen normalerweise zuerst in Fahrzeugen der Oberklasse und Marktdurchdringung in etwa 10 Jahren. Daher vor 2020 kaum grössere Marktanteile für Brennstoffzellenfahrzeuge. Zeitraum voraussichtlich auch notwendig, um Versorgung mit Wasserstoff aufzubauen.

Flüssiggas-Fahrzeuge

Sicherheitsrelevante Eigenschaften

- Praxiserprobte Technik v.a. mit umgerüsteten Fahrzeugen in NL, B, I, PL, F seit einigen Jahrzehnten.
- Speicherung bei Druck von etwa 8 bar in flüssiger Form. Die Tanks sind bisher meist aus Stahl und auf einen Berstdruck von 30 (bis 40) bar ausgelegt.
- Sicherheitsventile verhindern beim Betanken des Fahrzeuges, dass dieser mehr als 80 % gefüllt wird, sodass Temperaturschwankungen kein Problem sind.
- Tanks mit Schmelzsicherungen, sodass im Brandfall Gas kontrolliert entweichen und abbrennen kann, um ein spontanes Bersten des Stahltanks durch große Hitze zu vermeiden.
- Rohrbrissventile: Bei Abreißen von Leitungen werden die entsprechenden Anschlüsse sofort versiegelt.

Entwicklungen bzgl. Verbreitung und Sicherheit

- Zunehmende Verbreitung in den genannten Ländern, kaum in der Schweiz
- Vermehrtes Angebot von Serienfahrzeugen durch einzelne Hersteller
- Flüssiggas wird mittelfristig durch das ähnliche Gas Dimethylether (DME) abgelöst.

Erdgas-Fahrzeuge

Sicherheitsrelevante Eigenschaften

- Praxiserprobte Technik
- Speicherung bei Druck von 230 (200-250) bar (Tanks ausgelegt für bis zu 600 bar). Die Auslegung auf hohe Drücke ergibt auch hohen Schutz vor mechanischer Einwirkung.
- Anordnung der meist mehreren Gaszylinder:
Unterfluranordnung (herstellereitige Konzepte und Ausrüstung)
Innenraumanordnung (z.B. bei Nachrüstung)
Rahmenganordnung, Dachtank (bei Bussen)
- Material: Stahl oder Verbundwerkstoffe mit Alu/Stahl und Karbonfasern
- Zwei Tanksysteme:
 - Fast Fill: Kompression und Zwischenspeicherung des Erdgases, Betankungszeit ähnlich Benzin/Diesel (1-2 Minuten)
 - Slow Fill: Kompressor fördert das verdichtete Gas ohne Zwischenspeicherung direkt in den Fahrzeugtank, geeignet für Betankung über längeren Zeitraum z.B. über Nacht auf betriebseigenen Tankstellen.
- Sicherungen:
 - Sicherheitsventil gegen Leckagen/Druckverlust in Leitungen (schliessen der Zufuhr vom Fahrzeugtank her)
 - Berstscheibe am Tank (kontrolliertes Abblasen des Erdgases aus dem Tank, Durchflussbegrenzer)
 - Schmelzsicherung für Temperaturanstieg im Tank (kontrolliertes Abblasen des Erdgases aus dem Tank bei Unterfeuerung des Tanks)
 - Elektrisch gesteuertes Magnetventil gibt Gasfluss nur frei, wenn Zündung eingeschaltet ist und Motor läuft.
 - Manuelle Ventile zum schliessen der Flaschen.

Entwicklungen bzgl. Verbreitung und Sicherheit

- Weitere Verbreitung erwartet, spezifisch optimierte Modelle einzelner Hersteller.
- Umrüstfahrzeuge sind eine zeitlich begrenzte Randerscheinung (relativ kleine Zahl).

Hybrid-Fahrzeuge

Sicherheitsrelevante Eigenschaften

- Praxiserprobte Technik
- Kombination von zwei Antriebssystemen: Prinzipiell Vorhandensein der Risiken beider Antriebe → siehe Sicherheitsrelevante Eigenschaften der einzelnen Antriebe
- Je nach Hybridisierung treten unterschiedlich hohe Bordspannungen auf; herstellerspezifische Lösungen
- Die Fahrzeuge im aktuellen Angebot zeigen alle einen hohen Sicherheitsstandard und haben bei Crashtests (Euro NCAP) gut abgeschnitten.

Entwicklungen bzgl. Verbreitung und Sicherheit

- Deutliche Zunahme der Hybrid-Technologie in verschiedensten Abstufungen ist zu erwarten.

Wasserstoff-Fahrzeuge

Sicherheitsrelevante Eigenschaften

- Erfahrungen mit Prototypen, Kleinserien
- Es sind zwei verschiedene Antriebssysteme möglich:
 - Wasserstoff zur Stromproduktion in Brennstoffzelle, Antrieb mit Elektromotor (siehe Brennstoffzellen-Fahrzeug)
 - Verbrennung von Wasserstoff im herkömmlichen Ottomotor
- Speicherformen
 - Speicherung in flüssiger Form, nicht mit längeren Stillständen vereinbar, da der Wasserstoff auf -253 °C gekühlt werden muss.
 - Druckspeicherung bei bis zu 700 bar
- Aufgrund der Zündfähigkeit von Wasserstoff-Luft-Gemischen sind bei Produktion, Vertrieb und Betrieb spezielle Sicherheitsvorkehrungen nötig.
- Äußerst widerstandsfähige Bauweise des Drucktanks (Auslegung auf mind. 2-fachen Speicherdruck). Hohes Gewicht des Tanks.
- Sicherheitsventile, thermisch aktivierte Druckentlastungsvorrichtungen mit Ablassleitungen
- Wasserstoffsensoren, meist im Kofferraum, unter der Fronthaube und im Innenraum, welche bei Auslösung den Tank schliessen.
- In Crashtests vergleichbar mit herkömmlichen Fahrzeugen; insbesondere vergleichbar mit gasbetriebenen Fahrzeugen.

Entwicklungen bzgl. Verbreitung und Sicherheit

- Gilt bei vielen Automobilherstellern als Antrieb der Zukunft.
- Doch ungeklärte Fragen bezüglich:
 - emissionsarme Erzeugung von ausreichenden Mengen Wasserstoff
 - Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur
- Mögliche zukünftige Speicherformen (Ergänzung zu oben genannten):
 - Speicherung in Methallhydriden, die bis zu 4% ihres Eigengewichts an Wasserstoff aufnehmen können (für Fahrzeuge aufgrund der geringen gewichtsbezogenen Speicherung eher nicht geeignet).
 - Speicherung in Nanoröhren, die bis zu 8% ihres Eigengewichts an Wasserstoff speichern können.

A3 Mengengerüst

Grundlagen Die Eckdaten für den Energieverbrauch und den Verkehr stützen sich auf folgende Grundlagen:

- BFE/Infras (2007): Der Energieverbrauch des Verkehrs 1990-2035. Ergebnisse der Szenarien I bis IV und der zugehörigen Sensitivitäten "BIP hoch", "Preise hoch" und "Klima wärmer".
- Bundesamt für Statistik BFS (2008): <http://superweb-guest.bfs.admin.ch/superweb/login.do>, Abgerufen am 25.1.2008.

Situation 2005

Tabelle 15:
Fahrzeugbestand 2005 nach
Typen und Treibstoffen /
Antrieben

Fahrzeugtyp	Benzin	Diesel	Elektrisch	Übrige Treibstoffe
Personenwagen	3'475'004 89.99%	381'189 9.87%	592 0.02%	4'657 0.12%
Personentransportfahrzeuge	14'148 30.91%	31'188 68.15%	32 0.07%	397 0.87%
Sachentransportfahrzeuge	114'903 37.41%	191'552 62.36%	126 0.04%	580 0.19%
Landwirtschaftsfahrzeuge	16'541 9.09%	165'003 90.64%	30 0.02%	460 0.25%

Tabelle 16:
Treibstoffverbrauch 2005

Treibstoffe	Verbrauch in 1'000 t	Anteil	Verbrauch in PJ	Anteil
Benzin	3'595.2	67.53%	157.50	67.6%
Diesel	1'713.8	32.19%	74.90	32.1%
Biogene TST	-	-	0.30	0.1%
Erdgas	-	-	0.33	0.1%
Summe	-	-	233.03	100.0%

Kursiv = Abgeschätzt aus weiteren Daten

Szenarien Verkehr 2005 - 2035

Fahrzeugbestand PW

Szenario	Einheit	2005	2015	2025	2035
Szenario I	in1000	3'864	4'249	4'503	4'614
Szenario Ib	in1000	3'864	4'151	4'372	4'466
Szenario II	in1000	3'864	4'249	4'503	4'614
Szenario III	in1000	3'864	4'249	4'503	4'614
Szenario IV	in1000	3'864	4'121	4'096	3'921

Kursiv = Abgeschätzt aus anderen Daten (Annahmen: Die Fahrzeugbelegung und die Fahrleistung ist in allen Szenarien gleich).

Fahrleistung PW

Szenario	Einheit	2005	2015	2025	2035
Szenario I	Mio. FzKm	53'689	58'174	60'876	63'091
Szenario Ib	Mio. FzKm	53'689	56'833	59'101	61'065
Szenario II	Mio. FzKm	53'689	58'174	60'876	63'091
Szenario III	Mio. FzKm	53'689	58'174	60'876	63'091
Szenario IV	Mio. FzKm	53'689	56'425	55'374	53'618

Kursiv = Abgeschätzt aus anderen Daten (Annahmen: Die Fahrzeugbelegung und die Fahrleistung ist in allen Szenarien gleich.

Verkehrsnachfrage MIV

Szenario	Einheit	2005	2015	2025	2035
Szenario I	Mrd. Pkm	93.5	99.8	102.9	105.9
Szenario Ib	Mrd. Pkm	93.5	97.5	99.9	102.5
Szenario II	Mrd. Pkm	93.5	99.8	102.9	105.9
Szenario III	Mrd. Pkm	93.5	99.8	102.9	105.9
Szenario IV	Mrd. Pkm	93.5	96.8	93.6	90.0

Annahmen zur
Fahrzeugbelegung und
Fahrleistung

Grösse	2005	2015	2025	2035
Belegungsgrad (MIV/FahrL.PW)	1.74	1.72	1.69	1.68
Fahrleistung je PW	13.89	13.69	13.52	13.67

Entwicklung Energieverbrauch
nach Treibstoffen 2005 und
2035 in PJ

Treibstoffe	2005		Szenario I		Szenario Ib		Szenario II		Szenario III		Szenario IV	
	Verbrauch in PJ	Anteile										
Benzin	157.5	67.6%	88.4	39.7%	60.7	31.7%	68.1	32.6%	54.9	30.6%	46.0	30.4%
Diesel	74.9	32.1%	128.8	57.9%	112.7	58.8%	122.2	58.6%	99.6	55.6%	80.6	53.3%
Biogene TST	0.3	0.1%	2.2	1.0%	12.4	6.5%	12.4	5.9%	18.2	10.2%	18.2	12.0%
Erdgas	0.3	0.1%	3.1	1.4%	5.9	3.1%	5.9	2.8%	6.5	3.6%	6.5	4.3%
Summe	233.0	100.0%	222.5	100.0%	191.7	100.0%	208.6	100.0%	179.2	100.0%	151.3	100.0%

A4 Gefahren-/Risikoanalyse Lagerung

Zuordnung der Treibstoffe zu Leitstoffen

Teilprozesse Im Prozess "Lagerung" enthalten sind die Anlieferung, Lagerung in Tanks, Arbeiten im Bereich der Lagertanks und der Umschlag von Treibstoff für den Transport.

Gruppen mit Leitstoffen Die grosse Zahl der verschiedenen Treibstoffe, die teilweise nur marginale Mengenanteile aufweisen, wird für die quantitativen Betrachtungen sogenannten Leitstoffen zugeordnet. Treibstoffe mit ähnlichen Eigenschaften bilden dabei eine Gruppe, die durch einen Leitstoff repräsentiert wird. Dies ist ein Vorgehen, wie es beispielsweise auch bei der Störfallverordnung Anwendung findet.

Gewichtungsfaktoren Die Zuordnung zu den Leitstoffen basiert bei brennbaren Flüssigkeiten auf dem Temperaturwert des Flammpunktes. Die Bildung von Temperaturklassen orientiert sich an der Nummer zur Kennzeichnung der Gefahr gemäss RID⁹⁾ ($\leq 23^{\circ}\text{C}$, $23 - 61^{\circ}\text{C}$ und $> 61^{\circ}\text{C}$). Das unterschiedliche Gefahrenpotenzial der Stoffklassen kommt in einem Gewichtungsfaktor zum Ausdruck. Die verwendeten Gewichtungsfaktoren sind für Flüssigtreibstoffe in Tabelle 17 dargestellt.

Tabelle 17:
Gewichtungsfaktoren für
Flüssigtreibstoffe
(Leitstoff Benzin)

Treibstoff	Gewichtungsfaktor	Flammpunkt
Benzin	1	$<-20^{\circ}\text{C}$
Diesel	0.25	$>55^{\circ}\text{C}$
Pflanzenöl	0.1	230°C (Rapsöl)
Biodiesel	0.1	180°C
Ethanol	1	12°C
CTL	0.25	n.b.
GTL	0.25	59°C (Beispiel)
BTL	0.25	n.b.
Methanol	1	11°C
ETBE (Ethyl-Tertiär-Butylether)	1	$<22^{\circ}\text{C}$

Leitstoffe Benzin und Diesel

Die Treibstoffe mit dem Gewichtungsfaktor 1 werden im Folgenden unter dem Leitstoff (LS) Benzin zusammengefasst, die Treibstoffe mit dem Gewichtungsfaktor 0.25 unter dem Leitstoff Diesel. Aufgrund der nahezu vernachlässigbaren Verbreitung von Pflanzenöl und Biodiesel als Treibstoff

9) Diese Flüssigkeiten gehören zum Brandgefährlichkeitsgrad F1 in der Terminologie des Brandverhütungsdienstes (BVD, heute Sicherheitsinstitut).

spielt im Weiteren die Temperaturklasse >61 °C keine Rolle. Pflanzenöl und Biodiesel werden zur Vereinfachung dem Leitstoff Diesel zugeordnet.

Separate Betrachtung der gasförmigen Treibstoffe

Die gasförmigen Treibstoffe weisen z.T. erhebliche Unterschiede in ihren gefährdungsrelevanten Stoffeigenschaften auf. Einzig DME lässt sich dem in seinen Stoffeigenschaften ähnlichen Flüssiggas zuweisen. Da im Jahr 2035 nur für Erd-/Biogas und Flüssiggas/DME von einer nennenswerten Verwendung als Treibstoff ausgegangen wird, entfallen die anderen Gase in der quantitativen Betrachtung.

Lagerung Flüssigtreibstoffe (zu Kapitel 4.2.1)

Absatz In der Schweiz betrug der Absatz von Mineralölen im Jahr 2005 total 14'105'000 m³ (100%) [Carbura 2006]. Davon entfallen auf die Treibstoffe:

- Benzin Bleifrei: 4'867'000 m³ (34.5%)
- Diesel: 2'063'000 m³ (14.6%)

Es wird angenommen, dass der Absatz und die Lagerhaltung in einer ähnlichen Grössenordnung liegen.

Lagerung alternativer Treibstoffe

Für die Risikoabschätzung wird davon ausgegangen, dass die mengenmässig relevanten alternativen Flüssigtreibstoffe in vergleichbarer Art und Weise gelagert werden wie Benzin-/Diesel. So kann das kollektive Risiko entsprechend der Treibstoffanteile und der Gewichtungsfaktoren (vgl. Tabelle 17) für die Jahre 2005 und 2035 errechnet werden.

Ereignisszenarien Flüssigtreibstoffe

Unfälle in den Stehtanks sind gut dokumentiert; die möglichen Ereignisszenarien sind daher recht gut bekannt. Typische Ereignisszenarien sind

- Bassinbrand mit Hitzestrahlungen und Rauchentwicklung, die sowohl den Menschen als auch Einrichtungen und Infrastrukturen und die Umwelt in einem grösseren Umkreis gefährden können.
- Auslaufen, oberflächliches Abfließen oder Abfließen in die Kanalisation: Lagergut verteilt sich im Areal oder in der Umgebung und gefährdet vor allem nahe gelegene Oberflächengewässer oder Grundwasser.
- Boil Over: Durch Erhitzen kommt es zu spontanem Verdampfen von Wasser am Tankboden was zu Auswurf von aufschäumendem und evtl. brennendem Öl aus dem Tank führt.
- Gaswolkenexplosion: Explosion im Freien oder in einem geschlossenen Raum (z.B. Pumpenhaus).

Störfälle in der Schweiz

In der Schweiz gab es in den letzten 35 Jahren fünf Störfälle an Stehtankanlagen, vier davon mit Explosionen [Carbura 2005]:

- 1970 Birsfelden (Tankexplosion)
- 1974 Cadenazzo (Tankexplosion)

- 1982 Gerlafingen (Tankexplosion)
- 1992 Vernier (Auslaufen)
- 1996 Deisswil (Tankexplosion und Brand)

Ereignisse weltweit

In einer Auswertung von 128 Störfällen von 1975 bis 1988 wurde ein max. Schadenausmass von 7 Todesopfern ermittelt [TNO 1999]. Die Auswirkungen beschränken sich meist auf das Betriebsareal. Ausnahmen mit Auswirkungen ausserhalb des Betriebsareals stellen folgende Ereignisse dar:

- Gaswolkenexplosion in Saint Herblain, Frankreich, Fensterbrüche bis in 2 km Distanz (1991)
- Buncefield, England, Explosion, 43 Verletzte (2005)

Eine weitere Untersuchung von 58 Zwischenfällen und Unfällen zeigt, dass es in ca. 20% der Fälle zu einem Brand kommt [INERIS 1996].

Damit ergeben sich folgende Szenarien mit Häufigkeiten und Ausmassen:

Tabelle 18:
Szenarien

Szenario	Häufigkeit	Ausmass
Relevante Freisetzung	ein Ereignis in 5 Jahren (0.1 /J)	Ausmassklasse A Sachschaden CHF 2. Mio.
Brand einer Tankanlage ohne Personenschäden	ein Ereignis in 10 Jahren (0.05 /J)	Ausmassklasse B Sachschaden CHF 5 Mio. (ohne Lagergut)
Brand einer Tankanlage mit Personenschäden	Ein Ereignis in 50 Jahren (0.01/J)	Ausmassklasse C Sach- und Personenschaden (1 Todesopfer), CHF 7.5 Mio. (ohne Lagergut)
Störfall: Brand/Explosion mit > 10 Todesopfer und/oder sehr grossem Sachschaden	ein Ereignis in 10 Jahren in Europa, Schweiz mit 1.5% Anteil (0.001/J)	Ausmassklasse D Sach- und Personenschaden (einige Todesopfer), CHF 50 Mio.

Rund die Hälfte der Ereignisse ist den Treibstoffen zuzuordnen.

Abschätzung des
kollektiven Risikos

Aufgrund der Tabelle 18 ergibt sich somit ein aktuelles kollektives Risiko (Schadenerwartungswert) bezogen auf die Lagerung von Treibstoff in der Schweiz von rund CHF 0.3 Mio. pro Jahr.

Lagerung Flüssiggas (zu Kapitel 4.2.3)

Verbrauch

Der Verbrauch von Flüssiggas als Treibstoff für den Strassenverkehr betrug 2005 ca. 523 t.

Ereignisszenarien

Bei der Lagerung gasförmiger Treibstoffe sind folgende Ereignisszenarien zu erwähnen:

- Freisetzung unter hohem Druck bei Beschädigung des Lagertanks oder von Leitungen, Gaswolkenbrand oder -explosion.
- Ansammlung von Gasen in Gebäuden/Hohlräumen, Bildung zündfähiger Gasgemische, Explosion.

Ereignisse in der Schweiz In der Schweiz sind keine bedeutenden Störfälle im Zusammenhang mit der Lagerung von Flüssiggas oder ähnlichen Gasen bekannt. Vereinzelt Brände / Explosionen von Gasflaschen treten auf, sind jedoch kein Indikator für Explosionen grosser Flüssiggastanks.

Ereignisbeispiele Weltweit können folgende Beispiele von Ereignissen angeführt werden:

- 7.12.2006, Falk Corporation Explosion: Kontinuierliche Freisetzung aus einem Tank von ca. 100 m³ und Explosion, 3 Todesopfer und 47 Verletzte, Milwaukee (WI/US)
- 19.4.1998, Herrig Brothers Propane Tank Explosion, Albert City (IA/US): Propantank von ca. 80 m³ explodiert, BLEVE, Todesopfer
- 17.12.1985, Propantank explodiert, Todesopfer, Glenwood Springs (CO/US)
- 18.1.1985, Propantank explodiert in Chicago (IL/US)

Annahmen Derzeit liegen in der Schweiz vorwiegend Erfahrungen für die Lagerung in relativ kleinen, oberirdischen Tanks in Verbraucheranlagen vor. Bei einer stärkeren Verbreitung von Flüssiggas als Treibstoff ist von grossen, gut geschützten, allenfalls erdbedeckten Lagertanks auszugehen.

Abschätzung des kollektiven Risikos Bezogen auf den aktuellen Verbrauch als Treibstoff sind die Risiken der Lagerung von Flüssiggas heute vernachlässigbar.

A5 Gefahren-/Risikoanalyse Transport

Vertriebsweg Flüssigtreibstoffe

Anlieferung in Inlanddepots	Die Flüssigtreibstoffe Benzin und Diesel werden von Tanklagern im Ausland oder von Tanklagern am Rheinhafen Basel auf der Schiene an die Inlanddepots geliefert. Die Inlanddepots werden meist von Gesellschaften betrieben, an denen die Mineralölfirmen beteiligt sind.
Schienentransport	Auf der Schiene werden Kesselwagen 65 t (95 m ³) eingesetzt, ein ganzer Blockzug umfasst 20 Wagen und transportiert 1'300 t (1'900 m ³). Die durchschnittliche Transportdistanz auf der Schiene innerhalb der Schweiz wird auf etwa 120 km geschätzt.
Strassentransport	Von den Tanklagern und den Inlanddepots werden Tankstellen mit Tanklastwagen direkt beliefert. Dazu werden Tanklastwagen, die bis ca. 38 m ³ Treibstoff laden können, eingesetzt.

Transport Strasse

Ereignisbeispiele	<p>Folgende schwere Ereignisse dienen der Illustration:</p> <ul style="list-style-type: none"> – 29.08.1998, Tanklastzugunfall in Zürich/CH: Unfall und Brand eines Tanklastzuges mit 25'000 l Dieselöl, keine Personenschäden – 07.07.1987, Tanklastzugunglück von Herborn/D: Unfall eines Tanklastzuges mit 34'000 l Treibstoff im Stadtkern von Herborn, 6 Todesopfer, 40 Verletzte, 12 Häuser brennen nieder. – 11.07.1978, Tanklastzugunglück von Los Alfaques/Katalonien: Unglück im Bereich des Campingplatzes Los Alfaques, 217 Todesopfer, mehr als 300 Verletzte.
Grundlage für Flüssigtreibstoffe	<p>Die Risikoabschätzung des Strassentransportes stützt sich auf Daten und Zwischenergebnisse aus der "Pilotrisikoanalyse für den Transport gefährlicher Güter, Fallbeispiel Autobahn" [BUWAL 1999].</p> <ul style="list-style-type: none"> – Transportkilometer: 9 Mio. Fahrzeugkilometer – Mittlere Unfallrate: $1 \cdot 10^{-6}$ Unfälle/Fahrzeugkilometer – Mittlere Freisetzungswahrscheinlichkeit: 0.04 /Unfall – Zündwahrscheinlichkeit: 0.2 /Freisetzung – Wahrscheinlichkeit für Todesopfer: 0.5 /Ereignis mit Zündung <p>Alle Angaben sind gerundete Werte.</p>

Tabelle 19:
Szenarien

Szenario	Häufigkeit	Ausmass
Relevante Freisetzung ohne Zündung	0.3/J	Ausmassklasse A Sachschaden CHF 0.3 Mio.
Relevante Freisetzung mit Zündung ohne Personenschaden	0.04/J	Ausmassklasse B Sachschaden CHF 3 Mio.
Relevante Freisetzung mit Zündung und Personenschaden	0.02/J	Ausmassklasse C Sach- und Personenschaden (1 bis 2 Todesopfer), CHF 10 Mio.
Relevante Freisetzung mit Zündung und Personenschaden (Störfall)	0.002/J	Ausmassklasse D Sach- und Personenschaden (≥ 2 Todesopfer), CHF 30 Mio.

Für die bezeichneten Szenarien ergibt sich ein kollektives Risiko (Schadenerwartungswert) von rund CHF 0.5 Mio. pro Jahr (bezogen auf Flüssigtreibstoffe für den Strassenverkehr).

Grundlage für Flüssiggase

Die Risikoabschätzung des Strassentransportes stützt sich auf Daten und Zwischenergebnisse aus der "Pilotrisikoanalyse für den Transport gefährlicher Güter, Fallbeispiel Autobahn" [BUWAL 1999].

- Transportkilometer: 0.003 Mio. Fahrzeugkilometer
- Mittlere Unfallrate: $1 \cdot 10^{-6}$ Unfälle/Fahrzeugkilometer
- Mittlere Freisetzungswahrscheinlichkeit: 0.004 /Unfall
- Zündwahrscheinlichkeit: 0.3 /Freisetzung
- Wahrscheinlichkeit für Todesopfer: 0.7 /Ereignis mit Zündung

Alle Angaben sind gerundete Werte.

Tabelle 20:
Szenarien

Szenario	Häufigkeit	Ausmass
Freisetzung ohne Zündung	7E-06/J	Ausmassklasse A Sachschaden CHF 0.3 Mio.
Zündung und Freistrahbrand	3E-06/J	Ausmassklasse C Sach- und Personenschaden (1 bis 2 Todesopfer), CHF 10 Mio.
Gaswolkenbrand	5E-07/J	Ausmassklasse C Sach- und Personenschaden (1 bis 2 Todesopfer), CHF 10 Mio.
BLEVE	2E-07/J	Ausmassklasse D Sach- und Personenschaden (über 2 Todesopfer), CHF 50 Mio.

Für die bezeichneten Szenarien ergibt sich ein vernachlässigbares kollektives Risiko (bezogen auf Flüssiggas für den Strassenverkehr).

Transport Schiene

Ereignisbeispiele Folgende schweren Ereignisse beim Transport von Treibstoffen auf der Schiene dienen der Illustration:

- 04.01.1991: Entgleisung von 8 von 14 Kesselwagen eines Benzintransportzugs beim Bahnhof Stein-Säckingen. Drei der Kesselwagen schlugen leck und entzündeten sich. 75'000 Liter Benzin verbrannten, versickerten oder flossen in die Kanalisation, weshalb in weitem Umkreis Explosionsgefahr herrschte und ein Teil des Dorfs Stein evakuiert werden musste.
- 27.07.1991: Frontalkollision bei Bahnhof Oebisfelde/D. D-Zug und Güterzug mit 27 Kesselwagen Benzin, 6 der Kesselwagen explodierten und brannten aus. 3 Todesopfer, 21 Verletzte.
- 08.03.1994: Entgleisung eines Güterzuges mit 20 Benzin-Zisternwagen im Bahnhof Zürich-Affoltern. Ein Wagen explodierte, vier brannten explosionsartig aus. Drei Personen wurden verletzt, eine davon schwer. In ganz Zürich-Nord herrschte bis am Abend akute Explosionsgefahr wegen ausgeflossenen Benzins in der Kanalisation.

Grundlagen für Flüssigtreibstoffe

Die Risikoabschätzung des Schienentransportes stützt sich auf Daten und Zwischenergebnisse aus der "Pilotrisikoanalyse für den Transport gefährlicher Güter, Fallbeispiel Bahn" [BUWAL 1998].

- Transportkilometer: 9 Mio. Wagenkilometer
- Mittlere Freisetzungswahrscheinlichkeit: $2.5E-09$ /Wagen-Kilometer
- Zündwahrscheinlichkeit: 0.5 /Freisetzung
- Anteile Bahnhof / freie Strecke: 0.66 / 0.33

Alle Angaben sind gerundete Werte.

Tabelle 21:
Szenarien

Szenarien	Häufigkeit	Ausmass
Freisetzung ohne Zündung	1.1E-02 /J	Ausmassklasse B Sachschaden CHF 3 Mio.
Freisetzung mit Zündung, freie Strecke	4E-03 /J	Ausmassklasse C Sachschaden CHF 10 Mio. (ohne Lagergut)
Freisetzung mit Zündung, Bahnhof	7.5E-03 /J	Ausmassklasse D Sach- und Personenschaden (mehrere Todesopfer), CHF 30 Mio.

Für die bezeichneten Szenarien ergibt sich ein kollektives Risiko (Schadenerwartungswert) von rund CHF 0.3 Mio. pro Jahr (bezogen auf Flüssigtreibstoff für den Strassenverkehr).

Grundlagen für Flüssigtreibstoffe

Die Risikoabschätzung des Schienentransportes stützt sich auf Daten und Zwischenergebnisse aus der "Pilotrisikoanalyse für den Transport gefährlicher Güter, Fallbeispiel Bahn" [BUWAL 1998].

- Transportkilometer: 0.002 Mio. Wagenkilometer
- Mittlere Freisetzungswahrscheinlichkeit: 2.5E-010 /Wagen-Kilometer
- Zündwahrscheinlichkeit: 0.8 /Freisetzung
- Anteile Bahnhof / freie Strecke: 0.66 / 0.33

Alle Angaben sind gerundete Werte.

Tabelle 22:
Szenarien

Szenarien	Häufigkeit	Ausmass
Freisetzung ohne Zündung	1E-07 /J	Ausmassklasse B Sachschaden CHF 3 Mio.
Freisetzung mit Zündung, freie Strecke	1E-07 /J	Ausmassklasse C Sachschaden CHF 10 Mio. (ohne Lagergut)
Freisetzung mit Zündung, Bahnhof	3E-07 /J	Ausmassklasse D Sach- und Personenschaden (mehrere Todesopfer), CHF 30 Mio.

Für die bezeichneten Szenarien ergibt sich ein vernachlässigbares kollektives Risiko (bezogen auf Flüssiggas für den Strassenverkehr).

Transport Erd-/Biogas

Grundlagen Netz und Verbrauch von Erdgas in der Schweiz lassen sich mit folgenden Zahlen charakterisieren:

- Rohrleitungsnetz: 16'638 km
- Absatz gesamt (2005): 33'589 GWh
- Absatz als Treibstoff (2005): 9'068 t/a bzw. 112.4 GWh¹⁰
- Anteil Treibstoff am Gesamtverbrauch: 0.335%

Annahmen für die
Risikoabschätzung

Die Risikoabschätzung basiert im Wesentlichen auf Burgherr [2005]. Daten aus Deutschland bilden die Basis, von der die Ergebnisse für die Schweiz abgeleitet werden. Gemäss Burgherr [2005] sind die Strukturen in Deutschland und der Schweiz vergleichbar, sodass eine entsprechende Ableitung möglich ist (vergleichbare Gasnetze und Zustände).

Zu berücksichtigen ist, dass sich die ausgewerteten Unfälle nicht nur auf den hier relevanten Transport des Gases in Rohrleitungen beschränken, sondern dass auch Unfälle bei der Exploration, Förderung, Verarbeitung,

¹⁰⁾ 9'068'000 kg * 1 Nm³/0.81kg * 10.04 kWh/m³ = 112'398'420 kWh = 112.4 GWh

Lagerung und der Entsorgung enthalten sind. Eine Datenbasis zur Abschätzung des Anteiles der Unfälle beim Transport ist nicht verfügbar. Es wird pauschal die Annahme getroffen, dass der dem Transport zuzuordnende Anteil der Unfälle 20% beträgt.

Risikoabschätzung Zur Risikoabschätzung werden die Risiken des Gasleitungsnetzes in Deutschland [vgl. Burgherr 2005] auf die Verhältnisse in der Schweiz umgerechnet:

- Anzahl Todesfälle aus Gasverbrauch in der Schweiz (Eigenanlagen der Gaswirtschaft): 0.17 Todesopfer/J
- Anteil Todesopfer aus Transport: $0.17 \text{ T/J} * 0.2 = 0.034 \text{ T/J}$
- Anzahl Todesfälle bezogen auf den Anteil für Treibstoffe (2005): $1.14 * 10^{-4}$ Todesopfer/J

Abschätzung des kollektiven Risikos Daraus ergibt sich ein vernachlässigbares kollektives Risiko rund CHF 570.-/J (bezogen auf Erdgas für den Strassenverkehr).

A6 Gefahren-/Risikoanalyse Tankstelle

Grundlagen

Betrachteter Prozess Der Prozess umfasst die Anlieferung, Lagerung in der Tankstelle, Verteilung des Treibstoffs, Arbeiten an Tankstelle, Unfall an Tankstelle.

Mengengerüst
[BFS 2008]

Pw-km CH 2005	54'338'000'000 km
Anzahl PW CH 2005	3'860'000
Mittlere Fahrleistung pro PKW	14'077 km
Benzinverbrauch pro 100 km (Neuwagen 2005)	7.67 l/100 km
Benzinverbrauch pro PKW	1'080 l/Jahr
Mittlerer Tankinhalt (Annahme)	60 l
Mittlere Tankmenge (Annahme)	45 l
Mittlere Anzahl Tankvorgänge pro PKW	24 pro Jahr
Anzahl Tankvorgänge	92'616'102 Tankvorgänge

Mengenschwellen gemäss
Störfallverordnung [StfV; vgl.
Bonomi 2006]

Treibstoff	Mengenschwelle
Benzin	200'000 kg
Diesel	500'000 kg
Ethanol	20'000 kg
Methanol	2'000 kg
Methan	20'000 kg
Propan	20'000 kg
Dimethylether (DME)	20'000 kg
Wasserstoff	5'000 kg

Unfälle an Tankstellen In Deutschland ereignen sich täglich rund 4 Unfälle durch unvorsichtige Fahrer an den rund 15'000 Tankstellen [Brück 2007]. Dies sind umgerechnet jährlich rund 100 Unfälle pro 1000 Tankstellen. Für die Schweiz wird von vergleichbaren Zahlen ausgegangen.

Szenarientabellen

Strukturierte Darstellung Für jeden Prozess und Treibstoff werden die möglichen Gefährdungen strukturiert in Szenarientabellen aufgeführt und bezüglich Häufigkeit und Schadenausmass klassiert.

Inhalt der Tabellen

Die Tabellen enthalten folgende Informationen (Spalten):

- Gefährdung/Initialereignis: Gefährdung oder Ursache
- Folgeereignis: Aus der Gefährdung entstehendes typisches Ereignis
- Szenarien: Ereignis, aus dem der hauptsächliche Schaden entsteht.
- Häufigkeitsklasse: Einstufung I bis V
- Ausmassklasse: Einstufung A bis D
- Verbreitete Massnahmen: Wesentliche Massnahmen werden aufgeführt, ohne Anspruch auf Vollständigkeit zu erheben.

Tabelle 23:
Häufigkeitsklassen

Klasse	V "sehr un- wahrschein- lich"	IV "unwahr- scheinlich"	III "selten"	II "gelegent- lich"	I "häufig"
Mittlere Anzahl Ereignisse pro 1 Mrd. Fzg.-km	$< 5.0 \cdot 10^{-4}$	$5.0 \cdot 10^{-4}$ bis $< 5.0 \cdot 10^{-3}$	$5.0 \cdot 10^{-3}$ bis $< 5.0 \cdot 10^{-2}$	$5.0 \cdot 10^{-2}$ bis < 0.5	> 0.5

Tabelle 24:
Ausmassklassen

Klasse	A "klein"	B "mittel"	C "gross"	D "sehr gross"
Bedeutung	Sachschäden, Leichtverletzte	Schwerverletzte	bis einzelne To- desopfer	mehrere Todesop- fer

Die Angaben zur Häufigkeit sind auf 1 Mia. Fahrzeugkilometer normiert.

Tankstelle Flüssigtreibstoffe

Gefährdung/ Initialereignis	Folgeereignis	Szenarien	Häufigkeits- klasse	Ausmass- klasse	Verbreitete Massnahmen	
Freisetzung beim Befüllen ab Tankfahrzeug aufgrund: <ul style="list-style-type: none"> – Mechanischer Einwirkung auf das Tankfahrzeug oder Schläuche (inkl. Kollision) – Überfüllen – Versagen oder Abreißen des Füllschlauchs – Fehlmanipulation Personal 	Entstehen einer Benzinlache und entzündlicher Gase	B-T-1a: keine Zündung	III	A	Sicherungen/Ventile Bauliche Vorkehrungen (Platz, Entwässerung)	
		B-T-2a: Zündung und Lachenbrand ohne Unterfeuerung des Tankwagens	IV	B		
		B-T-3a: Lache bei oder unter Tankfahrzeug, Zündung, Erhitzen des Tankinhaltes unter Druck und BLEVE	V	C		
	Treibstoff gelangt in Kanalisation, Bildung von zündfähigem Gas-Luft-Gemisch	Treibstoff gelangt in Boden	B-T-4a: keine Zündung, Sammlung in Ölabscheider	III	A	Leitungen und Tank im Boden Überwachung der Dichtheit
			B-T-5a: keine Zündung, gelangt in Gewässer	IV	B	
			B-T-6a: Zündung, Explosion	V	B	
			B-T-7a: keine Zündung	IV	B	
Leckage an Tank oder Leitungen	Freisetzung in Boden	B-T-7b: keine Zündung	IV	B	Leitungen und Tank im Boden Überwachung der Dichtheit	
		B-T-1c: keine Zündung	IV	A		
Arbeiten an oder im Bereich der Anlage	Entstehen einer Benzinlache und entzündlicher Gase	B-T-6b: keine Zündung	IV	A	Leitungen und Tank im Boden Überwachung der Dichtheit Geschützte und gekennzeichnete Leitungen Saugleitungen, Rohrbrissventil am Fuss der Zapfsäule	
		B-T-2b: Zündung und Lachenbrand	IV	A		
Unfall – Freisetzung durch Kollision mit Zapfsäule	Entstehen einer Benzinlache und entzündlicher Gase		IV	A	Saugleitungen, Rohrbrissventil am Fuss der Säule Leitungen im Boden	

Anmerkungen

Tankstellen unterstehen nicht der Störfallverordnung.

Die sicherheitsrelevanten Eigenschaften und Unterschiede der verschiedenen Flüssigtreibstoffe sind bei der Analyse zum Fahrzeugeinsatz beschrieben. Für die Belieferung, Lagerung etc. sind sie nicht von Relevanz.

Ereignisse bei der Belieferung treten in der Schweiz mehrmals pro Jahr auf. Im Allgemeinen handelt es sich um Freisetzungen geringer Mengen ggf. einiger hundert Liter, ohne Zündung.

Tanksäulen werden ebenfalls mehrmals pro Jahr beschädigt oder umgefahren, ohne dass Folgerereignisse daraus entstehen.

Tankstelle Erdgas

Gefährdung/ Initialereignis	Folgeereignis	Szenarien	Häufigkeits- klasse	Ausmass- klasse	Verbreitete Massnahmen
Unbeabsichtigte Beschädigung von Erdgasleitungen innerhalb Tankstelle (z.B. Baggerarbeiten)	Geringe Freisetzung in Boden bzw. Umgebungsluft	M-T-1a: Zündung, Gaswolkenbrand	V	A	Geschützte und gekennzeichnete Leitungen Sicherungen/Ventile, die bei Druckabfall die Zufuhr absperren
Schäden in Verdichteranlage oder Flaschenspeicher		M-T-1b: Zündung, Gaswolkenbrand/Explosion	IV	B	Sicherungen/Ventile, die bei Druckabfall die Zufuhr absperren
Fahrzeug kollidiert mit Tanksäule oder Verdichterraum	Entstehen einer Benzinlache (kollidiertes Fahrzeug)	M-T-1c: Zündung der Treibstofffläche und Unterfeuerung der Gasflaschen in Verdichterraum	IV	C	Sicherungen/Ventile, die bei Druckabfall die Zufuhr absperren bzw. zu kontrolliertem Abblasen des Gases führen → Freistrahbrand Massive Verdichterranlagen-Gebäude.

Anmerkungen

Erdgas-Tanksäulen werden meist gemeinsam mit Tankstellen für Flüssigtreibstoffe betrieben. Die Betankung erfolgt mit der für Gas üblichen Füllkupplung (TK 16) oder mit einer Füllkupplung als Zapfpistole (TK 17). Beide verfügen über Sicherheitsventile, die nur einen Gasaustritt erlauben, wenn sie ordnungsgemäss mit dem Einfüllstutzen verbunden sind.

In den sog. Fast-Fill-Tankstellen werden meist 3-Bankspeicher mit 290 bar als Zwischenspeicher eingesetzt, welche aus drei einzelnen Teilspeichern, der Hoch-, Mittel-, und Tiefbank (unterschiedliche Druckniveaus) bestehen. Dies erlaubt das Betanken der Fahrzeuge mit ähnlichem Komfort, wie er heute von Benzin- und Dieseltankstellen gewohnt ist. Die Alternative zum Fast Fill System ist das Slow Fill System: Ein Kompressor fördert dabei das verdichtete Gas ohne Zwischenspeicherung direkt in den Fahrzeugtank. Dieses System ist geeignet für Betankung über einen längeren Zeitraum z.B. über Nacht auf betriebseigenen Tankstellen.

Der Schweizerische Verein des Gas- und Wasserfaches SVGW hat für Erdgas-Tankstellen und -Fahrzeuge Richtlinien und Reglemente erlassen:

- G8d – Richtlinien für den Bau, Betrieb und Unterhalt von Erdgas-Kleintankstellen
- G9d – Richtlinien für den Bau, Betrieb und Unterhalt von Erdgas-Grosstankstellen
- G10d – Richtlinien für erdgasbetriebene Motorfahrzeuge
- G/TISG202d – Reglement für gasbetriebene Motorfahrzeuge

Tankstelle Flüssiggas

Gefährdung/ Initialereignis	Folgeereignis	Szenarien	Häufigkeits- klasse	Ausmass- klasse	Verbreitete Massnahmen
Freisetzung beim Befüllen ab Tankfahrzeug aufgrund: – Mechanischer Einwirkung auf das Tankfahrzeug oder Schläuche (inkl. Kollision) – Fehlimanipulation Personal, Überfüllen – Versagen oder Abreissen des Füllschlauchs	Ausbreitung in Bodennähe	L-T-1a: Zündung und Gaswolkenbrand	V	B	Sicherungen/Ventile Bauliche Vorkehrungen
	Zündung einer Benzinlache, Unterfeuerung Tankwagen	L-T-2a: Druckaufbau und Bersten des Tankwagens, Zündung, BLEVE	V	D	
	Ausbreitung in Bodennähe	L-T-1b: Zündung, Gaswolkenbrand	V	B	Geschützte und gekennzeichnete Leitungen Sicherungen/Ventile
Unbeabsichtigte Beschädigung von Gasleitungen innerhalb Tankstelle (z.B. Grabarbeiten)	Freisetzung, Ausbreitung in Bodennähe	L-T-1c: Zündung, Gaswolkenbrand	IV	C	Widerstand des Behälters Sicherungen/Ventile
FZ-Kollision mit Zapfsäule oder Tank	Erhitzung des Tanks	L-T-2b: Druckaufbau und Bersten des Tanks, Zündung, BLEVE	V	D	Widerstand des Behälters Sicherungen/Ventile

Anmerkungen

Flüssiggastanks werden für verschiedene Zwecke eingesetzt und sind weitverbreitet. Ab 20 t Inhalt unterstehen sie der Störfallverordnung.

Unterschiede in der Sicherheit bestehen bei ober- und unterirdischen Flüssiggastanks: Die unterirdischen sind gut vor äusseren Einwirkungen geschützt, während die oberirdischen Tanks externen Einwirkungen ausgesetzt sein können (Fahrzeuge). Kompakttankstellen, bei denen Tank und Säulen eine Einheit bilden, sind äusseren Einwirkungen eher ausgesetzt, insbesondere wenn sie auf Verkehrsflächen stehen.

Ladestation für Elektrofahrzeuge

Elektrofahrzeuge werden meist dezentral, beispielsweise zu Hause, geladen. Die von Ladestationen ausgehenden Gefahren des Stroms sind beim Fahrzeugeinsatz enthalten.

Betankung von Hybridfahrzeuge

Es treten grundsätzlich die gleichen Gefährdungen auf wie beim Tankvorgang des jeweils verwendeten Treibstoffes auf (z.B. Benzin). Das Laden der Batterie erfolgt im Allgemeinen während der Fahrt (s. Fahrzeugeinsatz Hybridfahrzeuge). Weitergehende Hybride, wie Plug-In-Hybride können analog den Elektrofahrzeugen an Ladestationen geladen werden.

Tankstelle Wasserstoff

Bei Wasserstofftankstellen ist sowohl die Anlieferung und Lagerung in Tanks als auch die Herstellung des Wasserstoffs vor Ort möglich. Ausgehend von einer Tankstelle für gasförmigen Wasserstoff sind Anlagen und Betrieb grundsätzlich vergleichbar mit einer Erdgas- oder Autogastankstelle (zu beachten: höherer Druck, unterschiedliche Stoffeigenschaften).

Gefährdung/ Initialereignis	Folgeereignis	Szenarien	Häufigkeits- klasse	Ausmass- klasse	Verbreitete Massnahmen
Freisetzung beim Befüllen ab Tankfahrzeug	Rasche Verflüchtigung nach oben	H-T-1a: Zündung und Explosion	V	C	Sicherungen/Ventile, die bei Beschädigung/Abreissen/Überfüllen Zufuhr absperren bzw. zu kontrolliertem Ablassen führen
Kollision eines Fz mit Tankwagen	Bildung einer Treibstofflache (kein Gas) oder Brand des Fahrzeugs und Unterfeuerung des Tankwagens	H-T-2a: Druckaufbau und Bersten des Tankwagens, Zündung, BLEVE	V	D	

Gefährdung/ Initialereignis	Folgeereignis	Szenarien	Häufigkeits- klasse	Ausmass- klasse	Verbreitete Massnahmen
Freisetzung durch Leckage an unterirdischen Treibstoffleitungen oder Tanks	Ausbreitung im Boden, an Oberfläche; bei oberirdischen Tanks und Leitungen rasche Verflüchtigung in Umgebungsluft	H-T-1b: Zündung, Explosion	V	B	Sicherungen/Ventile, die bei Beschädigung/Abreissen/Überfüllen Zufuhr absperren
Freisetzung aufgrund Beschädigung bei Arbeiten an der Anlage oder im Bereich der Anlage	Bei unterirdischen Leitungen, Ausbreitung im Boden; bei oberirdischen Tanks und Leitungen rasche Verflüchtigung in Umgebungsluft	H-T-1c: Zündung, Explosion	V	C	Widerstand des Behälters Gekennzeichnete und geschützte Leitungen Sicherungen/Ventile, die bei Beschädigung/Abreissen/Überfüllen Zufuhr absperren
Kollision eines Fz mit Tank	Bildung einer Treibstofflache (kein Gas) oder Brand des Fahrzeugs und Unterfeuerung eines Tanks	H-T-2b: Druckaufbau und Bersten des Tanks, Zündung, BLEVE	V	D	Sicherungen/Ventile, die bei Beschädigung/Abreissen/Überfüllen Zufuhr absperren bzw. zu kontrolliertem Abblasen führen
Umgebungsbrand	Erhitzung eines oberirdischen Tanks	H-T-2c: Druckaufbau und Bersten des Tanks, Zündung, BLEVE	V	D	

A7 Gefahren-/Risikoanalyse Fahrzeugeinsatz

- Betrachtete Elemente Die Betrachtung zum Fahrzeugeinsatz umfasst:
- Betankung
 - Fahrzeugeinsatz (abgestellt und in Betrieb, keine ereignisbedingten Einwirkungen)
 - Verkehrsunfall oder Panne, Brandeinwirkung
- Zu beachten ist, dass sich die Häufigkeiten, beispielsweise eines Brandes, auf treibstoffbedingte Ursachen beziehen und nicht alle Fahrzeugbrände insgesamt umfassen.

Fahrzeugeinsatz Flüssigtreibstoffe

(Benzin, Diesel, Ethanol, BtL/CtL/GtL, Biodiesel, Pflanzenöl, Methanol, ETBE)

Normalbetrieb: Betankung

Gefährdung/ Initialereignis	Folgeereignis	Szenarien	Häufigkeits- klasse	Ausmass- klasse	Verbreitete Massnahmen
Freisetzung aufgrund Leckage an Leitungen oder Motor, Fehlmanipulation oder Abreißen des Tankschlauches (geringe Menge)	Zündung des freigesetzten Benzins (heisse Motorenteile, offenes Feuer oder Funken)	B-E-1a: Brand des Fahrzeugs im Freien	III	A	Organisatorische Sicherheitsmassnahmen beim Befüllungsvorgang Sicherungen/Ventile, die bei Beschädigung/Abreißen/Überfüllen Zufuhr absperrern Bauliche Vorkehrungen (Platz, Entwässerung)

Normalbetrieb: Fahrzeugeinsatz

Gefährdung/ Initialereignis	Folgeereignis	Szenarien	Häufigkeits- klasse	Ausmass- klasse	Verbreitete Massnahmen
Freisetzung aufgrund Leckage an Tank, Leitungen oder Motor	Zündung des freigesetzten Benzins (heisse Motorenteile, offenes Feuer oder Funken)	B-E-1a: Brand des Fahrzeugs im Freien	I	A	
		B-E-1b: Brand des Fahrzeugs im Tunnel	II	A	
		B-E-1c: Brand des Fahrzeugs in Garage	II	A	

Unfall: mechanische und thermische Einwirkung

Gefährdung/ Initialereignis	Folgeereignis	Szenarien	Häufigkeits- klasse	Ausmass- klasse	Verbreitete Massnahmen
Kollision mit Beschädigung von Tank oder Leitungen (Freisetzung)	Falls Zündquelle (sehr heisse Motorenteile, Elektrik) → Fahrzeugbrand	B-E-2a: Brand des Fahrzeugs im Freien	II	C	Fahrzeugkonstruktion, Unterbruch von Treibstoffleitungen und elektrischer Stromkreise im Ereignisfall
		B-E-2c: Brand des Fahrzeugs in Tunnel	IV	C	vgl. B-E-1a, zusätzlich Infrastruktur in Tunnels

Anmerkungen

Eckwerte zur Einstufung der Ereignishäufigkeiten aus verschiedenen Quellen:

- In der Schweiz ist jährlich mit rund 3000 Fahrzeugbränden zu rechnen (TCS 2002). Überschlägig ist mit rund 2700 Fahrzeugbränden ohne vorausgehenden Unfall (90%) und 300 Bränden nach Unfall zu rechnen (10%).
- In den Jahren 2001 bis 2005 kamen durchschnittlich 332 Insassen von Personnenwagen ums Leben (BFS). Unter der Annahme eines Anteils von 0.5% der Todesopfer, die aufgrund eines Brandes ums Leben kommen, ergibt dies einen rechnerischen Wert von 2 Todesopfer/Jahr. Überschlägig ist mit einer Bandbreite von 1 bis 5 Todesopfer pro Jahr zu rechnen, wobei nur ein Teil davon ursächlich mit dem Treibstoff zusammenhängt.
- Bei rund 1% der Fahrzeugunfälle entsteht in der Folge ein Brand. Bei rund 3.5% der Fahrzeugunfälle mit Todesopfern ist ein Brand entstanden (TCS 2002).
- In 204 Unfällen mit Todesfolgen entstand in 29 Fällen ein Brand, wobei nur in einem Fall eine Person aufgrund des Brandes ums Leben kam (=0.5%) (GDV 1994).
- Die Brandrate ist aufgrund der Entwicklung in der Fahrzeugtechnik rückläufig (GDV 1994).
- 10% des Nationalstrassennetzes sind Tunnelstrecken. Bezogen auf das gesamte Strassennetz der Schweiz sind es ca. 5%.
- Der Anteil des kollektiven Risikos im Strassenverkehr, der einen unmittelbaren Bezug zum Treibstoff hat, wird insgesamt unter 1% liegen.

Fahrzeugeinsatz Erd-/Biogas

Normalbetrieb: Betankung

Gefährdung/ Initialereignis	Folgeereignis	Szenarien	Häufigkeits- klasse	Ausmass- klasse	Verbreitete Massnahmen
Freisetzung aufgrund Leckage an Tankfüllschlauch, Füllkupplung oder Motor, Fehlmanipulation oder Abreissen des Tankschlauches (geringe Menge)	Freisetzung im Freien, Zündung	M-E-1a: Gaswolkenbrand im Freien	IV	B	Organisatorische Sicherheitsmassnahmen beim Befüllungsvorgang Widerstandsfähiges Schlauchmaterial, das auf die hohen Drücke ausgelegt ist Sicherungen/Ventile, die bei Beschädigung/Abreissen die Zufuhr absperren.

Normalbetrieb: Fahrzeugeinsatz

Gefährdung/ Initialereignis	Folgeereignis	Szenarien	Häufigkeits- klasse	Ausmass- klasse	Verbreitete Massnahmen
Freisetzung aufgrund Leckage an Tank, Leitungen oder Motor (kleinste Mengen über Zylinder bei Stillstand)	Freisetzung im Freien und Zündung	M-E-1a: Gaswolkenbrand im Freien	IV	A	Äusserst widerstandsfähige Bauweise des Tanks
	Freisetzung im Tunnel und Zündung	M-E-1a: Gaswolkenbrand im Tunnel	IV	B	Geschütztes, widerstandsfähiges Leitungssystem
	Freisetzung in geschlossenen Räumen, Zündung, Explosion	M-E-1c: Explosion/Brand in Garage	III	C	Sicherungen/Ventile, die bei Beschädigung/Abreissen die Zufuhr absperren.

Unfall: mechanische und thermische Einwirkung

Gefährdung/ Initialereignis	Folgeereignis	Szenarien	Häufigkeits- klasse	Ausmass- klasse	Verbreitete Massnahmen
Kollision mit Beschädigung von Tank oder Leitungen	Freisetzung und Zündung im Freien	M-E-2a: Gaswolkenbrand im Freien	IV	C	Äusserst widerstandsfähige Bauweise des Tanks.

Gefährdung/ Initialereignis	Folgeereignis	Szenarien	Häufigkeits- klasse	Ausmass- klasse	Verbreitete Massnahmen
(Freisetzung)	Freisetzung und Zündung im Tunnel	M-E-2c: Gaswolkenbrand im Tunnel	V	E	Geschütztes, widerstandsfähiges Leitungssystem. Sicherungen/Ventile, die bei Beschädigung/Abreissen die Zufuhr absperren.
Unfall mit Brand und Erhitzungen des Tanks	Kontrolliertes Abblasen, Freistrahbrand	M-E-3a: Freistrahbrand	V	C	Schmelz- und Berstsicherung (führt zu kontrolliertem Abblasen des Gases) → Freistrahbrand

Anmerkungen

Der Einsatz als bivalente Fahrzeuge führt dazu, dass die Risiken beider Systeme – Gas und Benzin – grundsätzlich vorhanden sind.

Sicherheitsrelevante Abweichungen im Vergleich zu Flüssiggas:

- Hoher Druck in den Tanks führt zu massiverer, schwerer Bauweise (ausgelegt auf 600 bis 700 bar Berstdruck)
- Geringere Dichte als Luft, was ein rasches Verflüchtigen des Gases nach oben zur Folge hat, damit Ansammlung und Explosionsgefahr nur in Gebäuden und unter Überdachungen

Fahrzeugeinsatz Flüssiggasantrieb

Normalbetrieb: Betankung

Gefährdung/ Initialereignis	Folgeereignis	Szenarien	Häufigkeits- klasse	Ausmass- klasse	Verbreitete Massnahmen
Freisetzung aufgrund Leckage an Tankfüllschlauch, Füllkupplung oder Motor, Fehlmanipulation oder Abreißen des Tankschlauches (geringe Menge)	Freisetzung im Freien, Zündung	LPG-E-1a: Gaswolkenbrand im Freien	IV	B	Organisatorische Sicherheitsmassnahmen beim Befüllungsvorgang Widerstandsfähiges Schlauchmaterial, das auf die hohen Drücke ausgelegt ist Sicherungen/Ventile, die bei Beschädigung/Abreißen Zufuhr absperren

Normalbetrieb: Fahrzeugeinsatz

Gefährdung/ Initialereignis	Folgeereignis	Szenarien	Häufigkeits- klasse	Ausmass- klasse	Verbreitete Massnahmen
Freisetzung aufgrund Leckage an Tank, Leitungen oder Motor (kleinste Mengen über Zylinder bei Stillstand)	Freisetzung im Freien mit Zündung	LPG-E-1b: Gaswolkenbrand im Freien	IV	A	Widerstandsfähige Bauweise des Tanks. Geschütztes, widerstandsfähiges Leitungssystem (ausgelegt auf hohe Drücke).
	Freisetzung im Tunnel mit Zündung	LPG-E-1c: Gaswolkenbrand im Tunnel	IV	B	Sicherungen/Ventile, die bei Beschädigung/Abreißen Zufuhr absperren
	Freisetzung in geschlossenen Räumen, Zündung, Explosion	LPG-E-1d: Explosion/Brand in Garage	III	C	

Unfall: mechanische und thermische Einwirkung

Gefährdung/ Initialereignis	Folgeereignis	Szenarien	Häufigkeits- klasse	Ausmass- klasse	Verbreitete Massnahmen
Kollision mit Beschädigung von Tank oder Leitungen	Freisetzung und Zündung im Freien	LPG-E-2a: Gaswolkenbrand im Freien	III	C	Widerstandsfähige Bauweise des Tanks.
	Freisetzung und Zündung im Tunnel	LPG-E-2c: Gaswolkenbrand in Tunnel	V	D	Sicherheitsventil schliesst Tank bei Druckabfall. Geschütztes, widerstandsfähiges Leitungssystem.
Unfall mit Brand und Erhit- zen des Tanks	Kontrolliertes Abblasen, Freistrahbrand	LPG-E-3a: Freistrahbrand	V	C	Schmelz- und Berstsicherung (führt zu kontrolliertem Abblasen des Gases) → Freistrahbrand

Anmerkungen

Der Einsatz als bivalente Fahrzeuge führt dazu, dass die Risiken beider Systeme – Gas und Benzin – grundsätzlich vorhanden sind.

Sicherheitsrelevante Abweichungen im Vergleich zu Erdgas:

- Weniger widerstandsfähige Tanks aufgrund des geringeren Drucks als beim Erdgas
- Tiefere Zündtemperatur von Flüssiggas (ca. 450 °C anstelle von ca. 650°C)
- Tiefere Zündgrenze von Flüssiggas (1.9 – 9.5% anstelle von 5 – 15% Anteil am Luftgemisch)
- Höhere Dichte, die eine Ansammlung in Bodennähe ermöglicht.

Fahrzeugeinsatz Hybridfahrzeuge

Es treten grundsätzlich die gleichen Gefährdungen auf wie bei den einzelnen Antrieben, also bei Elektro- und Benzin- bzw. Elektro- und Erd-/BiogASFahrzeug (in Kombination).

Im kommerziellen Betrieb besteht rund 10 Jahre Erfahrung mit insgesamt über 1 Mio. verkauften Fahrzeugen. Es handelt sich um eine ausgereifte, etablierte Technik. Es sind keine Hinweise vorhanden, die aus statistischer Erfahrung auf spezifische Risiken oder Abweichungen in der Sicherheit von benzinbetriebenen Fahrzeugen hindeuten.

Mit Erd-/Biogas-Hybridfahrzeugen liegen bisher nur in der Entwicklung Erfahrungen vor. Da der Erdgasantrieb in Bezug auf das kollektive Personenrisiko als mit Benzin-Fahrzeugen vergleichbar eingeschätzt wird, wird bei Serienreife das gleiche Sicherheitsniveau angenommen, wie bei Flüssigtreibstoff-Hybridfahrzeugen.

Es treten sehr hohe und je nach Fahrzeughersteller bzw. System unterschiedliche elektrische Spannungen auf.

Fahrzeugeinsatz Elektro

Normalbetrieb: Betankung

Gefährdung/ Initialereignis	Folgeereignis	Szenarien	Häufigkeits- klasse	Ausmass- klasse	Verbreitete Massnahmen
Überladung oder Kurzschluss	Überhitzung und ggf. Brand/Explosion, Freisetzung von giftigen Verbrennungsprodukten Hohe elektrostatische Ladung kann zur Entzündung brennbarer Materialien in Umgebung führen	E-E-1a: Brand des Fahrzeugs im Freien	III	A	Temperatursensoren in jeder Batteriezelle Batteriemanagement mit Diagnosesystem, das die Batteriemodule ggf. ausschaltet Feuerhemmer in Elektrolyten (verhindern Zündung des Elektrolyten) Verwendung von Separatoren, die ab einer bestimmten Temperatur die Entladung stoppen
		E-E-1b: Brand des Fahrzeugs in Garage	III	B	

Normalbetrieb: Fahrzeugeinsatz

Gefährdung/ Initialereignis	Folgeereignis	Szenarien	Häufigkeits- klasse	Ausmass- klasse	Verbreitete Massnahmen
Überladung oder Kurzschluss	Überhitzung und ggf. Brand/Explosion, Freisetzung von giftigen Verbrennungsprodukten Hohe elektrostatische Ladung kann zur Entzündung brennbarer Materialien in Umgebung führen (z.B. Benzintank bei Hybridfahrzeugen)	E-E-2a: Brand des Fahrzeugs im Freien	III	A	Temperatursensoren in jeder Batteriezelle Batteriemanagement mit Diagnose-system, das die Batteriemodule ggf. ausschaltet Feuerhemmer in Elektrolyten (verhindern Zündung des Elektrolyten) Verwendung von Separatoren, die ab einer bestimmten Temperatur die Entladung stoppen
		E-E-2c: Brand des Fahrzeugs in Tunnel	III	B	
		E-E-2d: Brand des Fahrzeugs in Garage	II	A	

Unfall: mechanische und thermische Einwirkung

Gefährdung/ Initialereignis	Folgeereignis	Szenarien	Häufigkeits- klasse	Ausmass- klasse	Verbreitete Massnahmen
Kollision mit mech. Einwirkung auf Akkumulatoren oder Kabel	Kurzschluss, Brand/Explosion	E-E-3a: Brand des Fahrzeugs im Freien	II	C	Temperatursensoren in jeder Batteriezelle Batteriemanagement mit Diagnose-system, das die Batteriemodule ggf. ausschaltet Feuerhemmer in Elektrolyten (verhindern Zündung des Elektrolyten) Verwendung von Separatoren, die ab einer bestimmten Temperatur die Entladung stoppen
		E-E-3c: Brand des Fahrzeugs in Tunnel	IV	C	

Anmerkungen

Aufgrund der zunehmenden Elektrifizierung (Bordnetze mit höherer Spannung) auch herkömmlicher Fahrzeuge sind elektrische Gefahren ein zunehmend allgemeingültiger Punkt.

Die Betriebserfahrung mit batteriebetriebenen Elektrofahrzeugen ist vergleichsweise gering. Dementsprechend ist auch wenig Erfahrung aus Unfällen vorhanden. Es sind keine Informationen verfügbar, die auf verwertbare Ereigniserfahrungen hinweisen (immer unter der Bedingung gleichwertiger Fahrzeugkonzepte, insbesondere bezüglich der passiven Sicherheit).

Fahrzeugeinsatz Wasserstoff

Normalbetrieb: Betankung

Gefährdung/ Initialereignis	Folgeereignis	Szenarien	Häufigkeits- klasse	Ausmass- klasse	Verbreitete Massnahmen
Freisetzung aufgrund Leckage an Tankfüllschlauch, Füllkupplung oder Motor, Fehlmanipulation oder Abreißen des Tankschlauches (geringe Menge)	Freisetzung im Freien, Zündung	H-E-1a: Brand/Explosion im Freien	IV	B	Organisatorische Sicherheitsmassnahmen beim Befüllungsvorgang Widerstandsfähiges Schlauchmaterial, das auf die hohen Drücke ausgelegt ist (350-450 bar) Sicherungen/Ventile, die bei Beschädigung/Abreißen die Zufuhr absperren.

Normalbetrieb: Fahrzeugeinsatz

Gefährdung/ Initialereignis	Folgeereignis	Szenarien	Häufigkeits- klasse	Ausmass- klasse	Verbreitete Massnahmen
Freisetzung aufgrund Leckage an Tank, Leitungen oder Motor (kleinste Mengen über Zylinder bei Stillstand)	Freisetzung im Freien	H-E-1a: Explosion/Brand im Freien	IV	A	Äusserst widerstandsfähige Bauweise des Tanks Wasserstoffsensoren führen zu Ver-schliessen des Tanks Geschütztes, widerstandsfähiges Leitungssystem. Sicherungen/Ventile, die bei Beschädigung/Abreißen die Zufuhr absperren.
	Freisetzung im Tunnel und Zündung	H-E-1c: Explosion/Brand im Tunnel	IV	B	
	Freisetzung in geschlossenen Räumen, Zündung, Explosion	H-E-1d: Explosion/Brand in Garage	III	C	

