

BAFU UND SMU

# EINSATZFELDER UND NUTZEN DES ALKYLATBENZINS EIN LAGEBERICHT

Schlussbericht

Bern, 30. Oktober 2008

David Finger  
Ulrich Schöffeler  
Mario Keller

P7128A1\_SCHLUSSBERICHT\_20090714.DOC



INFRAS

INFRAS

MÜHLEMATTSTRASSE 45  
CH-3007 BERN  
t +41 31 370 19 19  
f +41 31 370 19 10  
BERN@INFRAS.CH

BINZSTRASSE 23  
POSTFACH  
CH-8045 ZÜRICH

WWW.INFRAS.CH

**Autoren**

Finger David, Schäffeler Ulrich, Keller Mario INFRAS AG

**Mitglieder Begleitgruppe**

Jenk Harald (Vorsitz), Bundesamt für Umwelt (BAFU)

Beuret Monika, Schweizerische Metallunion SMU

Bianchi Peter, Honda (Suisse) S.A.

Burgherr Natanael, Beratungsstelle für Unfallverhütung in der Landwirtschaft BUL

Furgler Andreas, Schweizerische Metallunion SMU

Helbling Hugo, Husqvarna Schweiz AG

Heusser Heinz, Honda (Suisse) S.A.

Kratzenberg Gerhard, Bundesamt für Verkehr BAV, Sektion Schifffahrt

Landis Marco, Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART

Loichat Nicole, Schweizerischer Baumeisterverband

Ohnmacht Ulrich, Lufthygieneamt beider Basel

Straehl Peter, Bundesamt für Umwelt (BAFU)

Voser Jürg, STIHL Vertriebs AG

Wiediger Claudia, Krebsliga Schweiz

Diese Studie wurde im Auftrag des BAFU und der Schweizerischen Metall-Union (SMU) verfasst.

Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

## INHALT

<b>ZUSAMMENFASSUNG</b>	<b>5</b>
<b>RÉSUMÉ</b>	<b>9</b>
<b>RIASSUNTO</b>	<b>16</b>
<b>1. AUSGANGSLAGE UND ZIELE</b>	<b>20</b>
<b>2. VORGEHEN</b>	<b>21</b>
<b>3. GENERELLES ÜBER ALKYLATBENZIN</b>	<b>23</b>
3.1. DEFINITION VON ALKYLATBENZIN	23
3.2. ALLGEMEINE VOR- UND NACHTEILE VON ALKYLATBENZIN	23
3.3. ZUSAMMENSETZUNG DER ABGASE VON VERBRENNUNGSMOTOREN	26
3.4. WIRKUNG DER ABGASE AUF DEN MENSCHEN	27
<b>4. AKTUELLE SITUATION IN DER SCHWEIZ</b>	<b>31</b>
4.1. DER HEUTIGE TREIBSTOFFVERBRAUCH IN DER SCHWEIZ	31
4.2. IDENTIFIKATION DER EINSATZFELDER	33
4.3. BESTAND, BETRIEBSDAUER UND TREIBSTOFFVERBRAUCH DER POTENZIELLEN EINSATZFELDER	37
4.3.1. Verbrennungsmotoren differenziert nach Einsatzbereichen	37
4.3.2. 2-Takt-Motoren differenziert nach Gerätetypen	39
4.4. ABSATZ DES ALKYLATBENZINS	42
<b>5. EMISSIONSMINDERUNG DURCH ALKYLATBENZIN</b>	<b>44</b>
5.1. REDUKTIONSPOTENZIAL DER EMISSIONEN DURCH ALKYLATBENZIN	44
5.1.1. Reduktionspotenzial bei 2-Takt-Motoren	45
5.1.2. Reduktionspotenzial bei 4-Takt-Motoren	48
5.1.3. Reduktionspotenzial der Ozonbildung durch den Einsatz von Alkylatbenzin	53
5.2. ZEITLICHE ENTWICKLUNG DER EMISSIONSFAKTOREN	53
5.3. FAZIT DER EMISSIONSMINDERUNG DURCH ALKYLATBENZIN	57
5.4. FAZIT BEZÜGLICH DER GESUNDHEITLICHEN VORTEILE VON ALKYLATBENZIN	59
<b>6. HOCHRECHNUNGEN DER BENZOL- UND NO<sub>x</sub>-EMISSIONEN</b>	<b>61</b>
6.1. SPEZIFISCHE EMISSIONEN VON GERÄTEN	61
6.1.1. Stündliche Benzol-Emissionen	61
6.1.2. Stündliche NO <sub>x</sub> -Emissionen	65
6.2. VERGLEICH DER JAHRESEMISSIONEN EINZELNER GERÄTE	66

6.3.	MINDERUNGSPOTENZIAL DER GESAMTSCHWEIZERISCHEN BENZOL-EMISSIONEN VON VERBRENNUNGSMOTOREN _____	68
<b>7.</b>	<b>SYNTHESE UND AUSBLICK _____</b>	<b>71</b>
7.1.	KERNAUSSAGEN _____	71
7.2.	FOLGERUNGEN UND AUSBLICK _____	73
	<b>ANNEX 1: GEFAHRENBEZEICHNUNG, RISIKO-SÄTZE UND RISIKO ASSESSMENT _____</b>	<b>75</b>
	<b>ANNEX 2: TREIBSTOFFVERBRAUCH UND BETRIEBSSTUNDEN _____</b>	<b>78</b>
	<b>ANNEX 3: EMISSIONEN VON 2-TAKT GERÄTEN _____</b>	<b>80</b>
	<b>ANNEX 4: EMISSIONEN VON 4-TAKT GERÄTEN _____</b>	<b>82</b>
	<b>ANNEX 5: MINDERUNGSSZENARIEN DER SCHWEIZERISCHEN BENZOL-EMISSIONEN _____</b>	<b>84</b>
	<b>LITERATUR _____</b>	<b>85</b>

## ZUSAMMENFASSUNG

### Zielsetzung

Alkylatbenzin (auch bekannt als Gerätebenzin) wird heute primär in benzinbetriebenen Kleingeräten wie z.B. Rasenmäher und Motorsägen eingesetzt. In älteren Grundlagen z.B. des BAFU (Bundesamt für Umwelt) wird plakativ formuliert, dass diese bis zu 100-mal mehr Benzol – ein hoch toxischer und karzinogener Luftschadstoff – ausstossen als ein herkömmlicher Personenwagen, wenn sie mit herkömmlichem Benzin betrieben werden. Mit Alkylatbenzin könne dieser Benzolausstoss deutlich reduziert werden. Das BAFU und die Schweizerische Metall-Union (SMU) wollen mit dieser Studie den Kenntnisstand in Sachen Alkylatbenzin aktualisieren, insbesondere Nutzen, Wirkung und Einsatzfelder identifizieren sowie Wissenslücken aufzeigen.

### Ergebnisse

- › Während herkömmliches Benzin einen grossen Anteil an Aromaten enthält (Moleküle, die aus mindestens einem aromatischen Ring bestehen), besteht Alkylatbenzin mehrheitlich aus Alkanen (Paraffine). Alkane sind Kohlenwasserstoff-Moleküle, bei denen keine Mehrfachbindungen zwischen den Atomen auftreten. Im Vergleich zu den robusten Aromaten lassen sich Alkane effizienter verbrennen, da sie keine Benzolringe enthalten. Zu den schädlichsten Abgasen gehören insbesondere Benzol, n-Hexan, 1,3-Butadien und Formaldehyd. Benzol ist erwiesenermassen karzinogen und als Klasse 1 Karzinogen eingestuft. Ebenso wurde bei den Schadstoffen Formaldehyd, Acetaldehyd, 1-3 Butadien und Ethen eine karzinogene Wirkung nachgewiesen. Diese Stoffe sind gemäss Suva in den Klassen 2 und 3 eingestuft.
- › Einige Messungen zeigen, dass sich durch den Einsatz von Alkylatbenzin die Emissionen von Benzol- und n-Hexan im Vergleich zum Betrieb mit herkömmlichem Benzin um über 80% reduzieren lassen. Dies ist aus lufthygienischer und gesundheitlicher Sicht der Hauptvorteil von Alkylatbenzin. Zudem verringern sich die NO<sub>x</sub>-Emissionen durch den Einsatz von Alkylatbenzin gegenüber herkömmlichem Benzin um ca. 20 bis 30%.
- › Generell sollte versucht werden, die schädlichsten Kohlenwasserstoffe sowohl in den Abgasen als auch während des Betankens eines Motors so tief wie möglich zu halten. Die Exposition ist während dem Betanken von Geräten besonders gross, weil beim Einatmen der Abgase oder bei Hautkontakt Kohlenwasserstoffe in den Blutkreislauf gelangen. Alkylatbenzin ist in diesen Situationen besonders vorteilhaft.

- › Die Abgaskomponenten von Alkylatbenzin sind durch tiefere Ozon-Reaktivitätspotenziale charakterisiert. Theoretische Hochrechnungen zeigen, dass sich mit Alkylatbenzin die bodennahe Ozonbildung gegenüber herkömmlichem Benzin um zirka 40% verringern lässt. Über 98% der ozonbildenden Abgaskomponenten stammen allerdings aus Quellen, wo Alkylatbenzin nicht oder nur begrenzt eingesetzt werden kann (namentlich Strassenverkehr und Dieselmotoren).
- › Daneben weist Alkylatbenzin praktische Vorteile auf, wie bessere Lagerungsfähigkeit des Treibstoffs, Schonung des Motors durch besseren Betrieb (geringeres Klopfen) und besseres Startverhalten. Dem stehen vor allem zwei Nachteile gegenüber: hohe Kosten (von 4.20 bis 5.50 CHF pro Liter) und begrenzte Verfügbarkeit.
- › Durch den Einsatz von Alkylatbenzin könnten vor allem bei jenen Motorenklassen die karzinogenen Benzol- und andere giftige Abgaskomponenten wirksam verringert werden, deren spezifischer Kohlenwasserstoffausstoss – ausgedrückt in g pro Kilogramm Treibstoff – überdurchschnittlich hoch ist. Den höchsten Kohlenwasserstoffausstoss weisen Kleingeräte des Offroad-Sektors mit 2-Takt-Motoren auf. An zweiter Stelle folgen 2-Takt-Motorräder und Mofas. Deutlich geringer – aber gleichwohl nennenswert – sind die Kohlenwasserstoffemissionen von 4-Takt-Offroad-Motoren und 4-Takt-Motorrädern. Motorräder können aus finanziellen und praktischen Gründen jedoch nicht zu den Haupteinsatzfeldern von Alkylatbenzin gezählt werden (geringe Zahlungsbereitschaft, begrenztes Interesse von Tankstellenbetreibern zum Aufbau der Versorgungsinfrastruktur). Deshalb steht für Alkylatbenzin der Offroad-Bereich im Vordergrund, und hier vor allem die Kleingeräte, die in der Land- und Forstwirtschaft sowie in der Gartenpflege zum Einsatz gelangen.
- › Derzeit werden in der Schweiz jährlich rund 4 Millionen Liter Alkylatbenzin verbraucht (3 Millionen Liter als 2-Takt- und 1 Million Liter als 4-Takt-Alkylatbenzin). Dies entspricht einem Marktanteil im Schweizer Offroad-Sektor von knapp 20% beim 2-Takt- und 2% beim 4-Takt-Benzin. Im professionellen Offroad-Bereich (z.B. Forstwirtschaft) wird Alkylatbenzin breit eingesetzt, im privaten Sektor besteht noch Potenzial für weitere Verbreitung.
- › Die benzinbetriebenen Motoren des Offroad-Sektors – das nächst liegende Einsatzfeld von Alkylatbenzin – waren im Jahr 2005 für rund ein Viertel der Gesamt-HC-Emissionen (Strassenverkehr und Offroad-Sektor) verantwortlich. Ähnlich ist die Situation hinsichtlich der Benzolemissionen. Die NO<sub>x</sub>-Emissionen von benzinbetriebenen Kleingeräten sind demgegenüber aus gesamtschweizerischer Sicht vernachlässigbar gering.
- › Die Luftschadstoffemissionen des Strassenverkehrs nehmen dank technischer Massnahmen – als Folge laufend verschärfter Emissionsgrenzwerte – seit mehreren Jahren kontinuier-

lich ab. Was im Strassenverkehr seit den 80er Jahren die Regel ist, trifft zunehmend auch für den Offroad-Sektor zu. So emittieren heutige moderne 2-Takt-Kleingeräte beispielsweise rund 6 mal weniger HC-Emissionen als noch vor gut 10 Jahren. Weitere Reduktionen sind absehbar. Der Einsatz von Alkylatbenzin ist grundsätzlich sowohl bei alten wie auch bei neueren Geräten sinnvoll. Dessen Einsatz ist bei älteren, hinsichtlich Emissionsverhalten weniger ausgereiften Verbrennungsmotoren besonders wirksam, weil die Reduktion - in absoluten Grössen ausgedrückt - ausgeprägter ist als bei modernen Geräten, deren Ausgangsniveau bereits tiefer ist.

- › Neben den Motoren wurde in den letzten Jahren aufgrund entsprechender gesetzlicher Vorgaben auch die Qualität des herkömmlichen Benzins verbessert. Unter anderem wurde der Benzolgehalt im konventionellen Benzin seit Januar 2000 auf 1 Vol.-% reduziert. Der marktübliche Benzolgehalt ging damit von 3 bis 4% auf unter 1% zurück, was eine entsprechende Absenkung der Benzol-Emissionen im Abgas zur Folge hat.
- › Durch intensivierte Informationskampagnen für vermehrten Einsatz von Alkylatbenzin könnten die gesamtschweizerischen Emissionen - namentlich von Benzol - zwar weiter verringert werden. Weit interessanter sind jedoch die Vorteile für den individuellen Anwender, d.h. die Minderung der Schadstoffexposition des Anwenders durch Alkylatbenzin. Da Anwender von Kleingeräten den Abgasen direkt ausgesetzt sind, macht der Einsatz von Alkylatbenzin in diesen Geräten am meisten Sinn. Auch typische moderne 2-Takt-Kleinmotoren emittieren noch gut 10-mal mehr Benzol pro Stunde als ein moderner Personenwagen der Abgasstufe EURO 4. Bei diesem Vergleich muss jedoch berücksichtigt werden, dass Kleinmotoren meistens unter Volllast betrieben werden, was bei Personenwagen selten der Fall ist. Durch Alkylatbenzin könnte dieser Wert drastisch reduziert werden. Als Nebennutzen werden auch die  $\text{NO}_x$ -Emissionen reduziert, wenn auch in geringem Ausmass.

### **Folgerungen**

- › Die oben beschriebenen Aussagen machen einen breiteren Einsatz von Alkylatbenzin zu einer empfehlenswerten lufthygienischen Massnahme, um die Schadstoff-Exposition beim Arbeiten mit Verbrennungsmotoren zu verringern. Aus gesundheitlicher und lufthygienischer Sicht ist vor allem die Verringerung der Benzol- wie auch der  $\text{NO}_x$ -Emissionen beim Einsatz von Alkylatbenzin hervorzuheben. Positiv wirkt sich das vor allem bei der Anwendung von Kleingeräten des Offroad-Sektors wie z.B. Gartenpflege und Forstwirtschaft aus.
- › Während der Einsatz von Alkylatbenzin im professionellen Bereich schon weitgehend die Regel ist, sollten auch private Anwender dazu angeregt werden, Alkylatbenzin in Kleinge-

räten zu benutzen. Die Mehrkosten für Alkylatbenzin sind in Anbetracht der zahlreichen praktischen und lufthygienischen Vorteile von Alkylatbenzin auch für private Anwender tragbar. Eine Informationskampagne über gesundheitliche Vor- und Nachteile von Alkylatbenzin hätte zudem den positiven Nebeneffekt, die Gesellschaft auf die grundsätzliche Problematik der Schadstoffbelastung zu sensibilisieren.

- › Die in diesem Bericht zusammengetragenen Informationen sind genügend belastbar, um diese grundsätzliche Empfehlung zugunsten von Alkylatbenzin abgeben zu können. Allerdings ist einzuräumen, dass die empirische Basis für quantitative Aussagen zu den Auswirkungen auf die Emissionen insbesondere von benzinbetriebenen Kleingeräten begrenzt ist. Weitere Messreihen könnten diese Aussagen untermauern. Diese sollten sich auf VOC und namentlich die kanzerogenen Komponenten konzentrieren, neuere Geräte sowie den heute üblichen Treibstoff (mit einem Benzol-Gehalt <1 Vol.-%) als Vergleichstreibstoff mit einbeziehen.



## RÉSUMÉ

### Objectif

Actuellement, l'essence alkylée est surtout utilisée dans les petits engins à moteur tels que tondeuses à gazon ou tronçonneuses. Les anciens documents, notamment ceux de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV), affirment que ces engins rejettent jusqu'à 100 fois plus de benzène – un polluant atmosphérique hautement toxique et cancérigène – qu'une voiture de tourisme classique lorsqu'ils fonctionnent à l'essence normale. Selon ces mêmes sources, l'essence alkylée permettrait de réduire considérablement les émissions de benzène. Avec la présente étude, l'OFEV et l'Union suisse du métal (USM) se proposent d'actualiser les connaissances sur l'essence alkylée, en particulier d'en identifier les avantages, les effets et les champs d'application et de mettre en évidence les lacunes actuelles de notre savoir en la matière.

### Résultats

- › Alors que l'essence classique contient une grande part d'aromates (molécules composées d'au moins un cycle aromatique), l'essence alkylée se compose généralement d'alcanes (paraffines). Les alcanes sont des molécules d'hydrocarbures dans lesquelles il n'y a pas de liaisons multiples entre les atomes. Comparativement aux robustes aromates, les alcanes brûlent de manière plus efficiente parce qu'ils ne contiennent pas de noyaux benzéniques. Parmi les effluents gazeux les plus nocifs, on peut citer le benzène, le n-hexane, le 1,3-butadiène et le formaldéhyde. Le benzène, dont l'effet cancérigène a été avéré, est classé comme « carcinogène du groupe 1 ». Une action cancérigène a également été démontrée pour le formaldéhyde, l'acétaldéhyde, le 1-3-butadiène et l'éthène. Ces substances sont inscrites dans les classes 2 et 3 par la Suva.
- › Quelques mesures montrent que l'utilisation de l'essence alkylée peut réduire de plus de 80 % les émissions de benzène et de n-hexane comparativement à l'essence classique. C'est là le plus grand avantage de l'essence alkylée dans l'optique de la qualité de l'air et de la santé. De plus, l'utilisation de cette essence abaisse les émissions de NO<sub>x</sub> de 20 à 30 % environ par rapport à l'essence classique.
- › En général, il faut essayer de maintenir aussi basse que possible la concentration des hydrocarbures nocifs tant dans les gaz d'échappement que pendant le remplissage du réservoir d'un moteur. L'exposition est particulièrement grande pendant cette dernière opération car, si des effluents gazeux sont inhalés ou entrent en contact avec la peau, les hy-

drocarbures pénètrent dans la circulation sanguine. Dans ces cas, l'essence alkylée est particulièrement avantageuse.

- › Les composants des effluents d'essence alkylée se caractérisent par des potentiels de réactivité plus faibles concernant la formation d'ozone. Des extrapolations théoriques montrent qu'avec l'essence alkylée, la formation d'ozone à proximité du sol est d'environ 40 % inférieure à ce qu'elle serait avec l'essence classique. Cependant, plus de 98 % des composants des effluents gazeux générateurs d'ozone proviennent de sources interdisant totalement ou partiellement l'usage d'essence alkylée (à savoir trafic routier et moteurs diesel).
- › En outre, l'essence alkylée offre des avantages pratiques: plus facile à stocker, elle est aussi moins agressive pour les moteurs grâce à sa meilleure combustion (moins de cliquetis) et à son meilleur comportement au démarrage. En revanche, elle présente deux inconvénients, son coût élevé (de 4,20 à 5,50 francs le litre) et sa disponibilité limitée.
- › L'utilisation d'essence alkylée pourrait réduire efficacement le benzène cancérigène et d'autres composants toxiques des effluents gazeux, surtout dans le cas des classes de moteurs dont les émissions spécifiques d'hydrocarbures – exprimées en g par kilogramme de carburant – sont supérieures à la moyenne. Ce sont les petits engins du secteur offroad dotés de moteurs à 2 temps qui provoquent les plus fortes émissions d'hydrocarbures. Sui-vent les motocycles et les cyclomoteurs à 2 temps. Quant aux moteurs d'engins offroad à 4 temps et de motocycles à 4 temps, ils produisent sensiblement moins d'hydrocarbures quand bien même ces émissions restent notables. Néanmoins, on ne saurait considérer les motocycles comme l'un des principaux champs d'utilisation de l'essence alkylée, cela pour des questions financières (faible disponibilité à payer le prix de cette essence, intérêt mitigé des exploitants de stations-service à mettre en place l'infrastructure nécessaire). Il en résulte que le champ d'application privilégié de l'essence alkylée est le secteur offroad, et plus précisément, les petits engins utilisés dans l'agriculture et l'exploitation forestière ainsi que dans le jardinage.
- › Actuellement, quelque 4 millions de litres d'essence alkylée sont consommés annuellement en Suisse (3 millions de litres pour les moteurs à 2 temps, 1 million par les moteurs à 4 temps). Cela correspond à une part de marché, dans le secteur offroad suisse, de 20 % pour l'essence 2 temps et 2 % pour l'essence 4 temps. L'essence alkylée est déjà très largement utilisée dans le secteur offroad professionnel (p.ex. exploitation forestière); en revanche il reste encore un certain potentiel à exploiter dans le secteur privé.
- › En 2005, les moteurs à essence du secteur offroad – le champ d'utilisation privilégié de l'essence alkylée – étaient responsables d'environ un quart des émissions totales

d'hydrocarbures (trafic routier et secteur offroad). La situation est similaire pour les émissions de benzène. Comparativement, les émissions de NO<sub>x</sub> des petits engins à essence sont globalement négligeables pour la Suisse.

- › Les émissions polluantes du trafic routier sont en régression continue depuis plusieurs années grâce à des mesures techniques induites par des limites d'émission toujours plus sévères. Cette observation dans le trafic routier depuis les années 80 se vérifie de plus en plus dans le secteur offroad. Ainsi, aujourd'hui, les petits engins modernes à 2 temps émettent environ six fois moins d'hydrocarbures qu'il y a une dizaine d'années. De nouvelles réductions sont prévisibles. A priori, l'emploi d'essence alkylée est judicieux tant pour les engins d'un certain âge que pour les nouveaux. Ce carburant est particulièrement efficace dans les moteurs à explosion d'un certain âge, moins aboutis, parce que la réduction des émissions – exprimée en valeurs absolues – y est plus marquée que sur les engins modernes qui, par définition, produisent moins d'émissions.
- › Outre celle des moteurs, on a assisté ces dernières années à l'amélioration de la qualité de l'essence classique, cela en raison de l'évolution du cadre légal. La teneur en benzène, notamment, a été réduite à 1 % en volume dans l'essence classique depuis janvier 2000. Ainsi a-t-elle généralement passé de 3 ou 4 % à moins de 1 %, ce qui a pour effet de réduire la concentration de cette substance dans les effluents gazeux.
- › Grâce à l'intensification de campagnes d'information visant à promouvoir l'emploi accru d'essence alkylée, il a été possible de continuer à réduire les émissions – notamment de benzène – produites en Suisse. Mais ce qu'il y a de beaucoup plus intéressant, ce sont les avantages pour l'utilisateur individuel, à savoir une moindre exposition aux polluants. Comme les utilisateurs de petits engins sont directement exposés aux effluents gazeux, il leur est particulièrement indiqué d'employer de l'essence alkylée. Même les petits moteurs à 2 temps modernes émettent encore au bas mot dix fois plus de benzène par heure qu'une voiture de tourisme moderne de la classe EURO 4. A quoi il faut ajouter, dans cette comparaison, que les petits moteurs fonctionnent le plus souvent à plein régime, ce qui est rarement le cas des voitures. L'essence alkylée pourrait donc réduire drastiquement cette valeur. Indirectement et dans une moindre mesure, cela permettrait également de diminuer les émissions de NO<sub>x</sub>.

## Conclusions

- › Les éléments énumérés ci-dessus montrent qu'étendre l'emploi de l'essence alkylée est une mesure qui permettrait d'améliorer la qualité de l'air et de diminuer l'exposition aux pol-

luants durant les travaux accomplis avec des engins équipés de moteurs à explosion. Dans l'optique de la santé et de la qualité de l'air, il faut surtout mettre en évidence que l'emploi d'essence alkylée favorise la diminution des émissions de benzène et de NO<sub>x</sub>. L'effet est surtout positif pour les petits engins dans le secteur offroad, par exemple dans le jardinage et l'exploitation forestière.

- › Alors que l'utilisation d'essence alkylée est déjà généralisée chez les professionnels, il faudrait aussi inciter les utilisateurs privés à se servir de ce même carburant dans les petits engins. Compte tenu des nombreux avantages de l'essence alkylée, sur le plan pratique, mais également en ce qui concerne la qualité de l'air, ses surcoûts sont aussi supportables pour les utilisateurs privés. Une campagne d'information sur les avantages et les inconvénients de cette essence aurait en outre un effet collatéral intéressant, la sensibilisation de la société à la problématique fondamentale de la pollution.

Les informations rassemblées dans ce rapport sont suffisamment étayées pour que l'on s'autorise à livrer cette recommandation de principe en faveur de l'essence alkylée. Cependant, il faut ajouter que la base empirique est limitée et ne permet pas de chiffrer les retombées sur les émissions, notamment celles des petits engins à moteurs à essence. Cela nécessiterait de nouvelles séries de mesures qui devraient se concentrer sur les COV et, plus précisément, sur les composants cancérigènes, et prendre en compte comme éléments de comparaison les engins relativement récents ainsi que le carburant usuel actuellement (avec une teneur en benzène inférieur à 1 % en volume).

## RIASSUNTO

### Obiettivi

La benzina alchilata, meglio conosciuta come «benzina per apparecchi» o «benzina Aspen», trova oggi principalmente impiego su piccoli macchinari a benzina come i tosaerba e le motoseghe. Nella documentazione meno recente, ad esempio quella dell'UFAM (Ufficio federale dell'ambiente), emerge in maniera evidente che, se alimentati con benzina tradizionale, questo tipo di macchinari rilasciano nell'atmosfera una quantità di benzolo 100 volte superiore a quella emessa da un'autovettura. Il benzolo è un inquinante atmosferico cancerogeno e altamente tossico. La benzina alchilata consentirebbe di ridurre drasticamente le emissioni di benzolo. Con il presente studio, l'UFAM e l'Unione Svizzera del Metallo (USM) intendono aggiornare lo stato attuale delle conoscenze in materia di benzina alchilata, identificandone in particolare i vantaggi, gli effetti, i campi d'impiego e colmando le lacune informative su questo tipo di combustibile.

### Risultati

- › Mentre la benzina convenzionale contiene un tasso elevato di composti aromatici (molecole composte da almeno un anello aromatico), la benzina alchilata è costituita prevalentemente da alcani (paraffine). Gli alcani sono molecole di idrocarburi, nelle quali mancano legami multipli tra gli atomi. Rispetto agli stabili composti aromatici, gli alcani presentano una combustione più efficiente per l'assenza di anelli benzenici. Tra i gas di scarico più nocivi figurano in particolare il benzolo, l'n-esano, l'1,3-butadiene e la formaldeide. Alcuni studi hanno dimostrato che il benzolo è cancerogeno. Per questo motivo è stato classificato nella categoria di cancerogenicità 1. È stato altresì comprovato l'effetto cancerogeno di altre sostanze quali il formaldeide, l'acetaldeide, l'1-3 butadiene e l'etilene che sono state classificate da Suva nelle categorie 2 e 3.
- › Alcune misurazioni hanno dimostrato che l'impiego di benzina alchilata è possibile ridurre di oltre l'80 per cento le emissioni di benzolo e di n-esano rispetto alla benzina convenzionale. Dal punto di vista dell'igiene dell'aria e della salute, questo dato rappresenta il principale vantaggio ascrivibile alla benzina alchilata. Inoltre, tale impiego permette di abbassare dal 20 al 30 per cento le emissioni di ossido di azoto derivanti dall'utilizzo di benzina alchilata rispetto a quella tradizionale.
- › In linea di principio, si dovrebbe cercare di ridurre al minimo gli idrocarburi nocivi sia nei gas di scarico, sia durante la fase di rifornimento del motore. Durante il rabbocco di picco-

li macchinari l'operatore è particolarmente esposto alle sostanze nocive poiché attraverso l'inalazione del gas di scarico o con il contatto con la pelle gli idrocarburi penetrano nel sangue. Da questo punto di vista la benzina alchilata presenta un sostanziale vantaggio.

- › I componenti dei gas di scarico della benzina alchilata sono caratterizzati da potenziali di reattività dell'ozono più bassi. Calcoli approssimativi teorici hanno messo in evidenza che impiegando benzina alchilata al posto di quella tradizionale si ottiene un calo di circa il 40 per cento della formazione dell'ozono. Tuttavia, più del 98 per cento dei componenti dei gas di scarico che generano ozono provengono da fonti dove la benzina alchilata non può essere utilizzata o può esserlo solo in minima parte (soprattutto nel traffico stradale e nell'alimentazione dei motori diesel).
- › La benzina alchilata presenta poi vantaggi anche in termini pratici: ha, ad esempio, una maggiore stabilità di stoccaggio, preserva il motore garantendone un funzionamento migliore (riduzione del battito in testa) e migliora l'avviamento dell'apparecchio. A questi vantaggi si contrappongono principalmente due inconvenienti derivanti dai costi elevati (da 4.20 a 5.50 CHF al litro) e dalla sua ridotta disponibilità sul mercato.
- › L'utilizzo della benzina alchilata permetterebbe di ridurre efficacemente i componenti benzenici e altri componenti tossici dei gas di scarico cancerogeni, soprattutto in quella categoria di motori le cui emissioni specifiche di idrocarburi – espresse in «g» per chilogrammo di carburante – risultano superiori alla media. I piccoli macchinari del settore «offroad» dotati di motori a due tempi presentano le emissioni di idrocarburi più elevate. Seguono al secondo posto le motociclette e i motorini a due tempi. Sensibilmente inferiori, ma pur sempre degne di nota, sono le emissioni di idrocarburi di motori «offroad» e di motociclette a 4 tempi. Tuttavia, per ragioni di ordine finanziario e pratico le motociclette non possono essere considerate il principale campo di impiego della benzina alchilata (scarsa disponibilità di pagamento, interesse limitato da parte dei gestori delle stazioni di rifornimento all'allestimento di una infrastruttura per l'approvvigionamento di benzina alchilata). Per questo, il principale campo d'impiego della benzina alchilata è quello «offroad», con particolare riferimento a piccoli macchinari in uso nell'agricoltura, nella silvicoltura e nel giardinaggio.
- › Attualmente in Svizzera il consumo di benzina alchilata è di circa 4 milioni di litri all'anno (3 milioni di litri come benzina alchilata a due tempi e un milione di litri come benzina alchilata a 4 tempi). Questo equivale ad una quota di mercato del 20 per cento scarsi nel settore dell'offroad in Svizzera per la miscela a due tempi e del 2 per cento per la benzina a 4 tempi. Nel settore «offroad» la benzina alchilata gode di diffusione su vasta scala a li-

vello professionale (ad esempio nella silvicoltura). Nel settore privato restano ancora potenziali per una maggiore penetrazione.

- › Nel 2005 i motori alimentati a benzina in uso nel settore «offroad», – il primo campo d'impiego di benzina alchilata – hanno generato circa un quarto delle emissioni complessive di HC (traffico stradale e settore «offroad»). Analoga è la situazione per quanto riguarda le emissioni di benzolo. Per contro, le emissioni di ossidi di azoto di piccoli macchinari alimentati a benzina sono relativamente trascurabili, se considerate in una prospettiva nazionale complessiva.
- › Grazie a misure tecniche che hanno avuto come conseguenza il continuo inasprimento dei limiti di emissioni, le emissioni di inquinanti atmosferici del traffico stradale sono costantemente in calo da diversi anni. Le regolamentazioni in uso dagli anni Ottanta per il traffico stradale stanno sempre più estendendosi anche al settore «offroad». È così che oggi moderni macchinari a due tempi generano circa 6 volte meno emissioni di HC rispetto a ben 10 anni fa. Si prevede che questa evoluzione continuerà anche in futuro. In linea di principio il ricorso a benzina alchilata si rivela vantaggioso sia sugli apparecchi già rodati che su quelli nuovi. Il suo utilizzo si rivela particolarmente efficace su macchinari più datati che adottano motori a combustione meno sofisticati dal punto di vista delle emissioni, in quanto la riduzione, espressa in grandezze assolute, è maggiore rispetto a quella ottenibile su apparecchi moderni, il cui livello di partenza è di per sé già basso.
- › Negli ultimi anni, in virtù di specifiche normative legali, oltre che sui motori vi sono stati miglioramenti anche per quanto riguarda la qualità della benzina tradizionale. Tra gli altri, dal gennaio 2000 il tenore di benzolo nella benzina convenzionale è stato portato a 1 vol. per cento. Il tenore di benzolo in commercio è dunque regredito da 3-4 per cento a meno di 1 per cento, con una conseguente riduzione delle emissioni di benzolo nei gas di scarico.
- › L'attuazione di campagne di informazione più intensive finalizzate alla promozione della diffusione di benzina alchilata ha permesso di abbattere ulteriormente le emissioni in tutta la Svizzera, in particolare quelle di benzolo. Tuttavia, l'aspetto più interessante è rappresentato dai vantaggi per il singolo operatore, ovvero la riduzione dell'esposizione alle sostanze nocive derivante dall'uso di benzina alchilata. Poiché gli operatori di piccoli macchinari sono esposti direttamente ai gas di scarico, l'utilizzo di benzina alchilata in questi apparecchi è ampiamente giustificato. Anche i tradizionali motorini a due tempi moderni emettono all'ora una quantità 10 volte maggiore di benzolo rispetto ad una moderna autovettura EURO 4. Occorre tuttavia considerare in queste comparazioni che i piccoli motori

lavorano prevalentemente a pieno regime, cosa che invece accade solo di rado nelle autovetture. Attraverso la benzina alchilata questo valore potrebbe essere drasticamente ridotto. Tra i vantaggi marginali di questo tipo di combustibile va menzionata anche la riduzione delle emissioni di ossidi di azoto, seppur in esigue percentuali.

### **Conclusioni**

- › Detto questo, l'utilizzo su più vasta scala di benzina alchilata non può che essere considerata una misura auspicabile per migliorare l'igiene dell'aria e per ridurre l'esposizione dell'operatore alle sostanze nocive durante il contatto con motori a combustione. Dal punto di vista salutistico e dell'igiene dell'aria va sottolineata in special modo la riduzione delle emissioni di benzolo e di ossidi di azoto ottenibile con l'utilizzo di benzina alchilata. I suoi effetti positivi si espletano soprattutto nell'uso su piccoli macchinari del settore «offroad» come per esempio gli apparecchi per il giardinaggio o la silvicoltura.
- › Se a livello professionale la benzina alchilata gode già di ampia diffusione, lo stesso non si può dire nel settore degli operatori privati per il quale si dovrebbe cercare di incentivare maggiormente l'uso di questo tipo di carburante sui piccoli macchinari. Pur presentando un costo maggiore rispetto alla benzina convenzionale, la benzina alchilata resta pur sempre un onere sostenibile anche per gli operatori privati, considerati gli innumerevoli vantaggi che apporta in termini di praticità e di impatto sull'igiene dell'aria. Una campagna informativa sui pro e contro che l'impiego della benzina alchilata implica per la salute dell'uomo permetterebbe inoltre di sensibilizzare la società sui problemi di fondo legati all'inquinamento da sostanze nocive.
- › Le informazioni raccolte in questo rapporto sono sufficientemente convincenti per fornire una raccomandazione di massima a favore dell'uso della benzina alchilata. Tuttavia, occorre convenire che la base empirica per dichiarazioni quantitative in merito alle ripercussioni sulle emissioni è limitata precipuamente ai piccoli macchinari alimentati a benzina. Ulteriori cicli di misurazione potrebbero avvalorare queste dichiarazioni. Essi si dovrebbero concentrare sui composti organici volatili (VOC) e specialmente sui componenti cancerogeni, su macchinari più avanzati includendo anche, come termine di paragone, i carburanti oggi comunemente in commercio (con un tenore di benzolo <1 vol. %).



## 1. AUSGANGSLAGE UND ZIELE

Mit Inkrafttreten der Luftreinhalte-Verordnung (LRV) wurde 1985 der juristische Grundstein für eine saubere Luftqualität in der Schweiz gelegt. In der Folge wurden zahlreiche Anstrengungen zur Reduktion der Luftbelastung unternommen. Dennoch sind in den letzten Jahren auch in der Schweiz die gesetzlich vorgeschriebenen Grenzwerte der Luftverschmutzung häufig überschritten worden. Dies hatte eine Reihe von politischen Vorstössen zur Folge. In jüngster Zeit verlangte beispielsweise die Kommission für Verkehr und Fernmeldewesen (KVF) die Prüfung nichtfiskalischer Massnahmen zur Förderung von aromatenfreiem Gerätebenzin, und die Kommission Umwelt, Raumplanung, Energie und Kommunikation (UREK) beauftragte den Bundesrat, Abgas- und Lärmtests für Motorräder und Mofas einzuführen. Das Bundesamt für Umwelt (BAFU) muss seinerseits gemäss seinem gesetzlichen Auftrag (z.B. LRV, Anhang 2 Ziffer 89) Massnahmen zur Luftreinhaltung vorschlagen. Neben den Massnahmen zur Reduktion der Emissionen im Strassenverkehr betrifft dies auch Massnahmen der Emissionsminderung ausserhalb des motorisierten Strassenverkehrs.

Im vorliegenden Bericht werden die lufthygienischen Vorteile von Alkylatbenzin (auch bekannt als Gerätebenzin) erläutert und quantifiziert. Alkylatbenzin wird primär in motorbetriebenen Kleingeräten wie z.B. Rasenmäher und Motorsägen eingesetzt. Diese Kleingeräte stossen – in älteren Grundlagen des BAFU (BUWAL, 1997; 1999) plakativ formuliert – bis zu 100-mal mehr Benzol – ein hoch toxischer und karzinogener Luftschadstoff – aus als ein herkömmlicher Personenwagen, wenn sie mit herkömmlichem Benzin betrieben werden. Langfristiges Ziel der Eidg. Lufthygiene-Kommission ist es, den Benzolausstoss in der Schweiz auf 100 t pro Jahr zu reduzieren (BUWAL, 2003). Mit Alkylatbenzin könne dieser Benzolausstoss deutlich reduziert werden. Das BAFU und die Schweizerische Metall-Union (SMU) sind sich einig, dass der Kenntnisstand in Sachen Alkylatbenzin nicht mehr auf dem neusten Stand des Wissens ist. Deshalb werden in der vorliegenden Studie Grundlagen zusammengetragen, um auf der Basis von Wirkung sowie Nutzen- und Kostenbetrachtungen sinnvolle Einsatzfelder von Alkylatbenzin zu identifizieren. Diese Grundlagen sollen auch eine Entscheidungshilfe für allfällige Fördermassnahmen sein. Gleichzeitig soll die Studie aktuelle Wissenslücken aufzeigen.

## 2. VORGEHEN

Um das ökologische und wirtschaftliche Potenzial von Alkylatbenzin in der Schweiz abschätzen zu können, werden vier Arbeitsschritte durchgeführt, welche jeweils in einem Kapitel im vorliegenden Bericht dargestellt werden. Im ersten Arbeitsschritt (Kapitel 3) werden die Eigenschaften von Alkylatbenzin vorgestellt und die Wirkungen einzelner Abgaskomponenten beschrieben. Der zweite Arbeitsschritt (Kapitel 4) befasst sich mit der aktuellen Marktsituation des Alkylatbenzins in der Schweiz und identifiziert die primären Einsatzfelder. Im dritten Arbeitsschritt (Kapitel 5) wird das Reduktionspotenzial der Emissionen von Verbrennungsmotoren durch den Einsatz von Alkylatbenzin quantifiziert. Im vierten Arbeitsschritt (Kapitel 6) werden anhand der Reduktionspotenziale von Alkylatbenzin Vergleiche durchgeführt, um die gesamtschweizerischen Emissionen unter alternativen Szenarien für den Einsatz von Alkylatbenzin abzuschätzen. Abschliessend werden im letzten Kapitel die wichtigsten Schlussfolgerungen zusammengefasst und ein Ausblick für nötige Zusatzuntersuchungen gemacht. Im Folgenden sind die Vorgehensweisen jedes Kapitels erläutert:

- › **Generelles über Alkylatbenzin:** Der Begriff ‚Alkylatbenzin‘ wird definiert und die Eigenschaften von Alkylatbenzin werden vorgestellt. Auf der Basis von Literaturrecherchen und Befragungen von Herstellern, Vertreibern und Anwendern werden allgemeine Grundlagen über Alkylatbenzin zusammengetragen. Zudem wird die Zusammensetzung von Alkylatbenzin herkömmlichem Benzin gegenübergestellt und die Wirkungen der einzelnen Komponenten auf den Menschen zusammengefasst.
- › **Aktuelle Situation in der Schweiz:** Ausgehend von der Offroad-Datenbank des BAFU (Infras, 2008) werden die Mengengerüste, die Betriebsdauern und die Benzinverbräuche der potenziellen Einsatzfelder von Alkylatbenzin analysiert. Zudem wird der Offroad-Sektor dem motorisierten Strassenverkehr (BUWAL, 2004), insbesondere den Motorrädern, gegenübergestellt. Anhand der Mengengerüste und Interviews mit Anwendern werden die Einsatzfelder und der heutige Absatz von Alkylatbenzin bestimmt.
- › **Emissionsminderung durch Alkylatbenzin:** Anhand einer Reihe von wissenschaftlichen Emissionsmessungen wird das Reduktionspotenzial einzelner Abgaskomponenten von Alkylatbenzin gegenüber herkömmlichem Benzin aufgezeigt. Die Emissionsmessungen stammen jedoch aus dem Zeitraum zwischen 1997 und 2008 und entsprechen somit unterschiedlichen Motorentechnologien. Deshalb werden die Reduktionspotenziale mit der zeit-

lichen Entwicklung der Emissionsfaktoren von Verbrennungsmotoren zwischen 1995 und 2020 verglichen.

- › **Quervergleiche und Hochrechnungen:** Um den Nutzen von Alkylatbenzin besser darzulegen, werden Hochrechnungen durchgeführt, die die Abgasminderung der gesamtschweizerischen Emissionen durch Alkylatbenzin quantifizieren. Dazu werden als Illustration die jährlichen Emissionen einzelner Geräte aus den Einsatzfeldern von Alkylatbenzin den Emissionen eines Personenwagens gegenübergestellt.

### 3. GENERELLES ÜBER ALKYLATBENZIN

#### 3.1. DEFINITION VON ALKYLATBENZIN

Benzin ist ein Gemisch aus einer Vielzahl verschiedener, überwiegend leichter Kohlenwasserstoffe (HC), welche unterschiedliche toxische Wirkungen auf Mensch und Umwelt haben können. Durch Raffination und Weiterverarbeitung von Erdöl lassen sich verschiedene Arten von Benzin herstellen, die sich in der Zusammensetzung der HCs unterscheiden.

Unter Alkylatbenzin, in der Umgangssprache auch Gerätebenzin genannt, fasst man alkylierte Benzine zusammen, welche vorwiegend frei von gesundheits- und umweltschädlichen Aromaten (zyklischen Kohlenwasserstoffen) sind (siehe Kapitel 3.4). Insbesondere beinhaltet Alkylatbenzin rund 20-mal weniger Benzol (ein starkes Karzinogen) als herkömmliches Benzin. In der Schweiz muss Alkylatbenzin der Schweizer Norm für Gerätebenzin (SN 181163, äquivalent zur deutschen Norm DIN 181163) entsprechen und kann in den meisten Benzinmotoren eingesetzt werden.

Es gibt nur wenige Raffinerien, die hochqualitatives Alkylatbenzin herstellen können, so zum Beispiel:

- › *Neste Oil*, ein Erdölunternehmen, welches sich 2005 vom finnischen Energieunternehmen *Fortum Oyj* abtrennte.
- › *Mineralölraffinerie Oberrhein GmbH & Co. KG (MiRO)*, ein deutsches Erdölunternehmen mit Standort in Karlsruhe am Oberrhein.
- › *PCK Raffinerie GmbH (PCK)*, ein deutsches Erdölunternehmen mit Standort in Schwedt/Oder im Nordosten Brandenburgs.

Alkylatbenzin wird zurzeit vor allem dort eingesetzt, wo der Mensch direkt den Abgasen der Maschine ausgesetzt ist, so zum Beispiel in Rasenmähern, Motorsägen oder im Modellbau. Erhältlich ist Alkylatbenzin als 4-Takt-Benzin oder als gebrauchsfertige Benzin-Öl-Mischung für 2-Takt-Motoren. Die Variante für Zweitaktmotoren ist mit teilsynthetischem oder auf Esther basierendem vollsynthetischem Mischungsöl vorgemischt.

#### 3.2. ALLGEMEINE VOR- UND NACHTEILE VON ALKYLATBENZIN

Neben verringerten Emissionen (siehe Kapitel 5) wird Alkylatbenzin von Herstellern und Fachhändlern eine ganze Reihe von praktischen Vorteilen gegenüber herkömmlichem Benzin zugesprochen. Die Vertreiber von Alkylatbenzin in der Schweiz machen insbesondere folgende Vorteile geltend (ASPEN, 2007):

- › **Lagerung:** Alkylatbenzin enthält keine reaktionsfreudigen Stoffe, ist chemisch stabil und kann mehrere Jahre gelagert werden. Herkömmliches Benzin enthält demgegenüber reaktionsfreudige Stoffe, die schon nach kurzer Lagerzeit oxidieren und polymerisieren. Aus diesem Grund lässt sich herkömmliches Benzin nur wenige Wochen bis Monate lagern. Zudem wird 2-Takt-Alkylatbenzin häufig schon als Benzin-Öl Gemisch verkauft.
- › **Besserer Betrieb:** Alkylatbenzin weist im Vergleich zu herkömmlichem Benzin (RON 95 und MON 85) eine höhere Oktanzahl auf (RON 95 und MON 92). Dadurch wird das Klopfen (unkontrollierte Verbrennung durch Selbstentzündung des Kraftstoffes) während des Betriebs reduziert und der Motor geschont.
- › **Besseres Starten:** Der Dampfdruck von Alkylatbenzin liegt mit 60 bis 65 kPa zirka 30 kPa unter dem Dampfdruck von normalem Benzin (Winterqualität<sup>1</sup>). Durch die geringere Verdampfung von Alkylatbenzin wird die Kohleablagerung im Motor minimiert und die Zuverlässigkeit während Warm- und Kaltstarts erhöht.
- › **Weniger giftig:** Beim Einatmen der Abgase des Alkylatbenzins oder bei Hautkontakt gelangen Paraffinkohlenwasserstoffe wie Butan, Pentan und Isooktan in den Blutkreislauf. Diese Stoffe können Schwindelgefühle verursachen und einschläfernde oder berauschende Wirkung haben; es sind jedoch keine Langzeiteffekte bekannt. Die Exponierung ist insbesondere während dem Betanken von Geräten gross. Die Abgase von herkömmlichem Benzin werden als gefährlicher eingestuft (siehe Kapitel 3.3), z.B. liegen Benzolkonzentrationen bei konventionellen Tankstellen ein mehrfaches über den in Innenstädten gemessenen Werten (Jordi, 2003).
- › **Schonung der Geräte:** Wenn die Gummikomponenten eines Motors mehrere Jahre lang Benzin ausgesetzt sind, kommt es zu Schäden und möglicherweise sogar zu Ausfällen. Herkömmliches Benzin besteht zu 35 Prozent aus starken Lösungsmitteln, die den Gummi angreifen und aufblähen. Wenn eine Maschine über einen längeren Zeitraum nicht benutzt wird, sind Gummiteile des Motors nicht mehr mit Benzin in Kontakt und die Lösungsmittel entweichen wieder aus dem Gummi. Falls sich dieser Vorgang mehrfach wiederholt, wird der Weichmacher aus dem Gummi gezogen, so dass der Gummi immer härter wird und sich schliesslich Risse bilden. Da das Alkylatbenzin keine starken Lösungsmittel enthält, wird dieser Vorgang durch Verwendung von Alkylatbenzin deutlich verlangsamt.

1 Im Winter liegt der Dampfdruck von herkömmlichem Benzin bei 84 kPa AGROLA (2005). Im Sommer hingegen muss auch herkömmliches Benzin einen Dampfdruck von 60 kPa einhalten (Anhang 5, Ziffer 5 LRV).

Den Vorteilen stehen zwei offensichtliche Nachteile von Alkylatbenzin gegenüber: die Kosten und die Verfügbarkeit.

› **Höhere Kosten:** Alkylatbenzin wird vom Fachhändler in Kanistern oder offen verkauft.

Der Preis für einen Liter Alkylatbenzin in Kanistern variiert zwischen 4.20 CHF und 5.50 CHF (Stand Januar 2008, Husqvarna Schweiz AG) und hängt auch von der gekauften Menge ab. Im offenen Verkauf liegt der Preis bei zirka 3.20 CHF. Da Alkylatbenzin als Treibstoff deklariert wird, enthalten diese Preise jeweils eine Mineralölsteuer von 0.73 CHF pro Liter (Stand März 2008).

› **Verfügbarkeit:** In der Schweiz wird Alkylatbenzin nur von sechs Fachhändlern importiert und hauptsächlich durch Geräthändler und einem Detailhändler vertrieben. In der Tabelle 1 sind die wichtigsten Importeure, deren Produktnamen für Alkylatbenzin und die Verkaufstellen in der Schweiz aufgelistet.

<b>IMPORTEURE VON ALKYLATBENZIN</b>		
<b>Firma</b>	<b>Produktname</b>	<b>Verkaufstelle</b>
Amstutz Produkte AG 6274 Eschenbach	Woodspeed, 2- und 4-Takt	Direktverkauf
Bucher AG 4901 Langenthal	Motorex Aspen, 2- und 4-Takt	Direktverkauf und Landmaschinenhändler
Husqvarna Schweiz AG 5506 Mägenwil	Aspen, 2- und 4-Takt	Landmaschinenhändler und Kleingerätetechnik; Bau + Hobby Märkte
Emil Hauser & Co. AG 8820 Wädenswil	Shell Gerätebenzin, 2- und 4-Takt	Shell Tochtergesellschaften Brennstoffhandel und Motorgeräthändler
STIHL Vertriebs AG 8617 Mönchaltorf	STIHL Motomix; STIHL Motoplus	Landmaschinenhändler und 10 Tankstellen
Strub + Co. AG 6260 Reiden	Biofuel, 2- und 4-Takt Clean Life, 2- und 4-Takt Oecofuel, 2- und 4-Takt	Direktverkauf, Motorgeräthändler und Landi-Läden

**Tabelle 1** Importeure von Alkylatbenzin, Produktnamen und Verkaufstellen in der Schweiz.

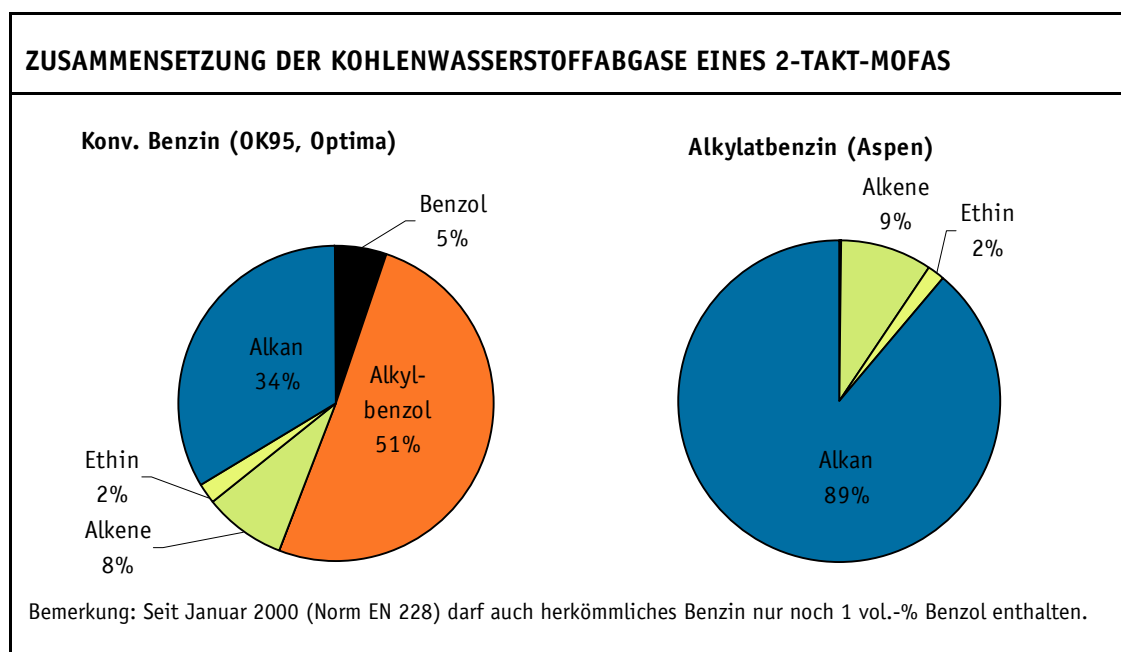
### 3.3. ZUSAMMENSETZUNG DER ABGASE VON VERBRENNUNGSMOTOREN

Benzin ist ein komplexes Gemisch aus über 100 verschiedenen, überwiegend leichten Kohlenwasserstoffen (HC), deren Siedebereich zwischen dem von gasförmigen Kohlenwasserstoffen und Petroleum liegt. Die einzelnen HC-Verbindungen sind jedoch sehr unterschiedlich giftig. Generell bestehen die HC-Verbindungen im Benzin aus zwei Hauptgruppen (ASPEN, 2007):

- › Aromatische Kohlenwasserstoffe (Benzol, Alkylbenzol)
- › Paraffine (Alkane).

Während konventionelles Benzin grosse Anteile an beiden Gruppen von HC-Verbindungen enthält, besteht Alkylatbenzin hauptsächlich aus Alkanen. Entsprechend ist auch die Abgaszusammensetzung eines Kleinmotors je nach Wahl des Treibstoffs unterschiedlich.

Östermark und Petersson (1993) haben die Abgase eines 2-Takt-Mofas untersucht und festgestellt, dass bei der Verwendung von Alkylatbenzin die Abgase hauptsächlich aus Alkanen bestehen, während die Abgase von herkömmlichem Benzin beträchtliche Mengen an Alkylbenzol enthalten (Figur 1). Benzol und Alkylbenzol sind besonders robuste, aromatische Kohlenwasserstoffe, die sich im menschlichen Körper sehr schwierig abbauen lassen und zudem karzinogen sind.



**Figur 1** Zusammensetzung der Kohlenwasserstoffabgase eines 2-Takt-Mofas beim Einsatz von normalem Benzin (linke Figur) und Alkylatbenzin (rechte Figur) nach Östermark und Petersson (1993). Methan-Kohlenwasserstoffe sind in dieser Darstellung nicht berücksichtigt.

Allerdings wurde aus lufthygienischen Gründen der Benzol-Anteil in herkömmlichem Benzin im Januar 2000 europaweit von 5 vol.-% auf 1 vol.-% herabgesetzt. Der Benzol-Anteil in den Abgasen eines mit herkömmlichem Benzin betriebenen Verbrennungsmotors dürften deshalb heute geringer sein als in den Messungen von Östermark und Petersson (1993).

### 3.4. WIRKUNG DER ABGASE AUF DEN MENSCHEN

In Anbetracht des Reduzierungspotenzials besonders schädlicher Abgaskomponenten durch den Einsatz von Alkylatbenzin müssen die gesundheitlichen Risiken der einzelnen Schadstoffe in den Abgasen diskutiert werden.

Aus gesundheitlicher Sicht sind die wichtigsten Abgase von Verbrennungsmotoren Kohlenmonoxid (CO), Stickoxide (NO<sub>x</sub>) und Kohlenwasserstoffe (HC). Während CO den Sauerstofftransport im Blut hindert, beeinträchtigt NO<sub>x</sub> vor allem die Atemwege (Tabelle 2). Unter dem Einfluss von UV-Strahlung kann sich aus einer Reaktion zwischen NO<sub>2</sub> und Sauerstoff das Reizgas Ozon (O<sub>3</sub>) bilden, welches ebenfalls die Atemwege beeinträchtigen kann. Die Wirkung der Kohlenwasserstoffe bedarf hingegen einer detaillierten Diskussion. Die meisten Kohlenwasserstoffe sind flüchtige organische Verbindungen (VOC - *volatile organic compounds*). VOCs sind organische Kohlenwasserstoffe, die leicht verdampfen (daher flüchtig sind) bzw. schon als Gas bei niedrigen Temperaturen (z.B. Raumtemperatur) vorliegen. Oft werden in Abgasmessungen auch polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) zu einer Stoffgruppe zusammengefasst.




Die Wirkungen von VOCs auf den Menschen sind äußerst heterogen (Tabelle 3). So reizt Formaldehyd zum Beispiel akut die Schleimhaut, Toluol und Xylol haben eine chronische neurotoxische Wirkung und Benzol ist ein Kanzerogen der Klasse 1. Auch den VOC-Molekülen Formaldehyd, Acetaldehyd, 1-3 Butadien und Ethen wird eine karzinogene Wirkung angelastet. Die Schweizerische Unfallversicherungsanstalt (Suva) hat sämtliche VOCs in 3 Karzinogenitäts- und Mutagenitäts-Klassen aufgeteilt (Suva, 2007). Kategorie 1 beinhaltet Stoffe, bei denen die Karzinogenität und die Mutagenität als erwiesen gelten. Bei Stoffen der Kategorie 2 gibt es hinreichende Anhaltspunkte, dass der Stoff karzinogen resp. mutagen ist. Stoffe der Kategorie 3 könnten möglicherweise karzinogene resp. mutagene Wirkungen auf Menschen haben. In Tabelle 3 sind die Karzinogenitäts- und Mutagenitäts-Klassen sämtlicher relevanten VOCs aufgelistet (Suva, 2007).

Neben den Suva-Klassen kann die Karzinogenität eines Schadstoffes auch durch so genannte Unit-Risks quantifiziert werden. Das Unit-Risik beschreibt die Wahrscheinlichkeit an Krebs zu erkranken, wenn man ein Leben lang (zirka. 70 Jahre) eine Konzentration von 1



$\mu\text{g m}^{-3}$  des entsprechenden Schadstoffes einatmet. Z.B. bedeutet ein Faktor von  $4.1 \times 10^{-6}$  für Benzol, dass statistisch gesehen aus 1 Million Personen 4.1 an Krebs erkranken würden, wenn sie über zirka 70 Jahre kontinuierlich  $1 \mu\text{g m}^{-3}$  Benzol inhalieren würden. In der Tabelle 3 sind die Unit-Risks für die wichtigsten VOC angegeben.

Neben einer Beschreibung der toxischen Wirkung sind in den Tabellen 2 und 3 auch die in Europa geltenden Gefahrensymbole und Risiko-Sätze (EWG, 1967) angegeben. Gefahrensymbole sind Piktogramme, die zusammen mit den Risiko-Sätzen einen ersten, allgemein erkennbaren Hinweis auf die Gefahren geben, die von einem Gefahrstoff ausgehen. In Europa müssen sämtliche Gefahrstoffe mit diesen international geltenden Gefahrensymbolen und R-Sätzen gekennzeichnet werden. So weisen z.B. die R-Sätze 45-46 in Tabelle 3 darauf hin, dass Benzol Krebs und vererbare Schäden verursachen kann. Die ebenfalls aufgelisteten Gefahrensymbole warnen vor der Entzündbarkeit und Toxizität von Benzol. Die Bedeutungen aller weiteren Gefahrensymbole und R-Sätze sind im Annex 1 (Tabelle 8 und 9) aufgelistet.

WIRKUNG DER ABGASE AUF DEN MENSCHEN				
Abgas	Beschreibung	Toxizität	GS	R-Sätze
CO	- farb-, geruch- und geschmackloses giftiges Gas	- hindert den Sauerstofftransport im Blut	 F+, T	R: 61-12-23-48/23
NO <sub>x</sub>	- Sammelbezeichnung für die gasförmigen Oxide des Stickstoffs; mit stechendem Geruch	- Reizung und Schädigung der Atmungsorgane	 T+	
O <sub>3</sub>	- instabiles Oxidationsmittel welches durch NO <sub>x</sub> und O <sub>2</sub> gebildet wird; Hauptkomponente von Smog; mit unangenehm stechendem Geruch	-Reizung der Atemwege	 O, T+, C	
HC	- Stoffgruppe von Verbindungen, die nur aus Kohlenstoff und Wasserstoff bestehen.	- einige aromatische HCs sind karzinogen	Siehe Tabelle 3	
VOC	- Sammelbegriff für flüchtige organische Verbindungen. Die meisten HCs sind VOCs. Oft sind daher HCs den VOCs gleichzusetzen.	- einige aromatische VOCs sind karzinogen		
PAK	- Sammelbegriff für die Summe aller polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe und somit eine Untergruppe der HCs.	- viele Verbindungen sind karzinogen (siehe Tabelle 3)		

**Tabelle 2** Toxizität der Abgaskomponenten nach einem Bericht der Österreichische Akademie der Wissenschaften (ÖAW, 1997) und Österreich (1996). Die Gefahrstoffkennzeichnung (GS) und die Risiko-Sätze entsprechen den europäischen Richtlinien (EWG, 1967).

BESCHREIBUNG UND WIRKUNG DER VOC							
VOC	Beschreibung	Toxizität	Unit Risk	Suva Karzi- nogenitäts- Klasse	Suva- Mutagenitäts- Klasse	GS	R-Sätze
n-Hexan	- farblose, flüchtige Flüssigkeit, die leicht nach Benzin riecht	chronische neurotoxische Wirkung; akute Toxizität (narkotische Wirkung)				F, Xn, N	R: 11-38-48/20-62-65-67-51/53
1,3-Butadien	- farbloses Gas mit mildem, aromatischen Geruch	Karzinogenität, wurde in mehreren Tierversuchen nachgewiesen; wirkt narkotisierend	$6.3 \times 10^{-6}$ Pro $\mu\text{g m}^{-3}$	2	2	F+, T	R: 45-46-12
Ethen	- farbloses, süßlich riechendes Gas	Wird zum aktiven karzinogenen Ethenoxid umgewandelt			3	F+	R: 12-67
Formaldehyd	- farbloses, stechend riechendes Gas	Karzinogenität ist in in-vitro Versuchen nachgewiesen worden; Reizung der Schleimhäute; chronische Atemfunktionsstörungen	$2.8 \times 10^{-7}$ Pro $\mu\text{g m}^{-3}$	3		T	R: 23/24/25-34-40-43
Acetaldehyd	- farbloses Gas	Karzinogenität geringer als bei Formaldehyd; Reizung der Schleimhäute; chronische Atemfunktionsstörungen	$2.0 \times 10^{-6}$ Pro $\mu\text{g m}^{-3}$	3		F+, Xn	R: 12-36/37-40
Benzol	- farblose, leicht flüchtige Flüssigkeit	Wurde mehrfach als Ursache für Leukämie identifiziert; zentral-narkotische Wirkung	$4.1 \times 10^{-6}$ Pro $\mu\text{g m}^{-3}$	1	2	F, T	R: 45-46-E48/23/24/25-11-36/38-65
Toluol	-farblose, charakteristisch riechende, flüchtige Flüssigkeit	Zentral-narkotische Wirkung; Reizung der Schleimhäute				F, Xn	R: 11-38-48/20-63-65-67
Xylole	-farblose Flüssigkeiten mit typischen aromatischen Gerüchen	Zentral-narkotische Wirkung; Reizung der Schleimhäute				Xn	R: 10-20/21-38

**Tabelle 3** Zusammenfassung der Wirkungen von VOCs auf den Menschen. Die Unit Risks wurden von ToxProbe (2002) übernommen. Karzinogenitäts- und Mutagenitäts-Klassen nach Suva (2007). Die Gefahrstoffkennzeichnung (GS) und die Risiko-Sätze entsprechen den europäischen Richtlinien (EWG, 1967).

Da es sich bei den Unit-Risks um statistische Wahrscheinlichkeiten handelt, dürfen sie höchstens für den relativen Vergleich verschiedener Abgase herbeigezogen werden. Die Bewertung von Formaldehyd ist zudem kontrovers und Gegenstand gegenwärtiger Untersuchungen. Aus diesem Grund verweisen wir in dieser Studie ausschliesslich auf publizierte Unit-Risks (ToxProbe, 2002). Neue Unit-Risks der EPA (USA) liegen zwar vor, sind jedoch bei Fachexperten umstritten (Pelley, 2008).

Aus Umwelt- und Gesundheitsgründen gilt es vor allem die besonders schädlichen Benzol-, n-Hexan-, 1,3-Butadien-, Formaldehyd- und Acetaldehyd-Emissionen zu reduzieren. Insbesondere Benzol kann systemische Wirkungen (Leukämie) verursachen (ÖAW, 1997; IARC, 2007). Aus gesundheitlichen Gründen ist Benzol daher der primäre Luftschadstoff, den es zu reduzieren gilt.

## 4. AKTUELLE SITUATION IN DER SCHWEIZ

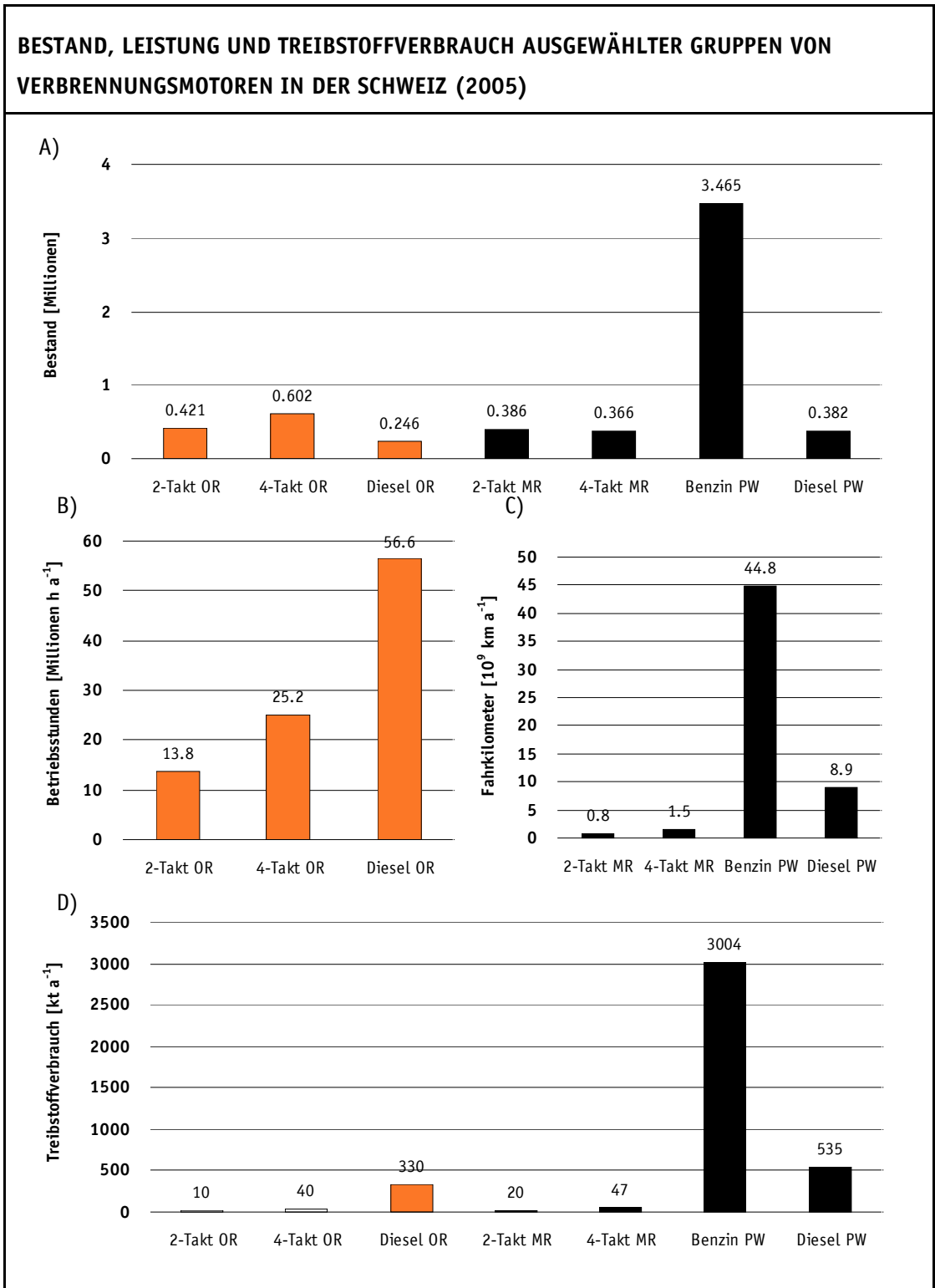
### 4.1. DER HEUTIGE TREIBSTOFFVERBRAUCH IN DER SCHWEIZ

Um das Potenzial von vermehrtem Einsatz von Alkylatbenzin erfassen zu können, muss vorerst der heutige Benzinverbrauch analysiert werden. In der Schweiz gibt es rund 6 Millionen Verbrennungsmotoren<sup>2</sup>, welche jährlich über 3 Millionen Tonnen bleifreies Benzin nach der Europäischen Norm EN 228 und 0.8 Millionen Tonnen Diesel verbrauchen (Figur 2 D). Die überwiegende Mehrheit (78%) dieser Verbrennungsmotoren werden im motorisierten Strassenverkehr eingesetzt (Figur 2 A). Im Jahr 2005 gab es in der Schweiz über 3.8 Millionen Motorfahrzeuge und rund 750'000 Motorräder (u.a. Scooter). Zudem gibt es ausserhalb des motorisierten Strassenverkehrs rund 1.3 Millionen Verbrennungsmotoren, die in allen möglichen Kleingeräten eingebaut sind. Knapp 81% der Offroad-Geräte sind mit 2-Takt oder 4-Takt-Motoren ausgerüstet, der Rest wird mit Dieselmotoren betrieben. In Figur 2 sind Bestand, Leistung und Treibstoffverbrauch aller Fahrzeuge und Maschinen aufgeführt.

In Hinblick auf den Treibstoffverbrauch ist die Einsatzdauer der einzelnen Motortypen relevant. Während im Strassenverkehr die Betriebsleistung eines Motors üblicherweise anhand der Fahrkilometer ( $\text{km a}^{-1}$ ) gemessen wird, werden im Offroad-Sektor die Betriebsstunden ( $\text{h a}^{-1}$ ) eines Motors erfasst. Die unterschiedlichen Einheiten machen einen direkten Vergleich der Gruppen schwierig (Figur 2 B und C). Fahrzeuge legen auf Schweizer Strassen jährlich rund 55 Milliarden Kilometer zurück. Nimmt man eine Durchschnittsgeschwindigkeit von  $39 \text{ km h}^{-1}$  an (BFS, 2007), so entspricht dies rund 1.4 Milliarden Betriebsstunden. Der gesamte Offroad-Sektor kommt auf 96 Millionen Betriebsstunden, wobei etwa 41% auf Benzinmotoren fallen.

Die Personenwagen (Benzin und Diesel) verbrauchen mit 3.5 Millionen Tonnen deutlich am meisten Treibstoff (Figur 2 D). Im Offroad-Sektor werden zirka 51'000 Tonnen Benzin verbraucht, was in etwa dem Benzinverbrauch sämtlicher Motorräder entspricht. Sowohl im Offroad-Sektor als auch bei den Motorrädern übertrifft der 4-Takt-Benzinverbrauch den 2-Takt-Benzinverbrauch um einen Faktor 3.8, resp. 2.4. Mit über 330'000 Tonnen ist der Dieserverbrauch im Offroad-Sektor etwa 6-mal höher als der Benzinverbrauch. Dieselmotoren können jedoch nicht mit Alkylatbenzin betrieben werden und werden daher in dieser Studie nur zu Vergleichszwecken aufgelistet.

<sup>2</sup> Nutzfahrzeuge sind in dieser Statistik nicht berücksichtigt, da diese mit Diesel betrieben werden und somit nicht mit Alkylatbenzin betrieben werden können. Diesel-Personenwagen sind jedoch zu Vergleichszwecken berücksichtigt.



**Figur 2** Bestand (A), Leistung (B,C) und Treibstoffverbrauch (D) der Verbrennungsmotoren in der Schweiz (Stand 2005). Die drei orange Säulen auf der linken Seite erschliessen den gesamten Offroad-Sektor (Infras, 2008), die vier schwarzen Säulen stellen den Strassenverkehr dar (BUWAL, 2004). OR steht jeweils für Offroad, MR für Motorräder und PW für Personenkraftwagen.

## 4.2. IDENTIFIKATION DER EINSATZFELDER

Neben der angestrebten Senkung der Exposition für Benutzer von Kleingeräten sollen durch den Einsatz von Alkylatbenzin auch die gesamtschweizerischen Emissionen gesenkt werden. Die gesetzlich reglementierten Emissionskomponenten, die für den Einsatz von Alkylatbenzin relevant sein könnten, sind Kohlenwasserstoffe (HC), Stickoxide ( $\text{NO}_x$ ) und Kohlenmonoxid (CO). In der Schweiz werden durch den Betrieb von ausgewählten relevanten Kategorien von Verbrennungsmotoren jährlich zirka 24 Tonnen HC-<sup>3</sup>, 31 Tonnen  $\text{NO}_x$ -<sup>4</sup> und 220 Tonnen CO-Emissionen erzeugt<sup>5</sup>. In Figur 3 sind diese Emissionen nach Motorentypen differenziert dargestellt.

Schweizweit gehen etwa 73% der HC-Emissionen aller Verbrennungsmotoren (Figur 3 A) auf das Konto von Strassenfahrzeugen (Personenwagen und Motorräder). Zirka 20% der HC-Emissionen werden von 2-Takt und 4-Takt-Kleinmotoren im Offroad-Sektor erzeugt. Der jährliche Treibstoffverbrauch des Offroad-Sektors ist jedoch im Vergleich zum Strassenverkehr gering (Figur 2). Mit Blick auf die Reduktionseffizienz interessiert daher, wie gross der Anteil der Emissionen pro verbrauchte Treibstoffmenge ist. Hier zeigt sich, dass die HC-Emissionen pro Treibstoffverbrauch (ausgedrückt in  $\text{g kg}^{-1}$ ) bei den 2-Takt-Motoren deutlich grösser sind als bei den 4-Takt-Motoren (Figur 3 B). Die 2-Takt-Motoren des Offroad-Sektors weisen mit rund 300  $\text{g kg}^{-1}$  die grössten HC-Emissionen pro  $\text{kg}$  Treibstoffverbrauch auf<sup>6</sup>. An zweiter Stelle folgen mit 213  $\text{g kg}^{-1}$  2-Takt-Motorräder. Mit je 40  $\text{g kg}^{-1}$  sind auch die HC-Emissionen pro  $\text{kg}$  Treibstoffverbrauch der 4-Takt-Offroad-Motoren und Motorräder beachtenswert. In Bezug auf die HC-Emissionen pro  $\text{kg}$  Treibstoffverbrauch können deshalb die 2-Takt und 4-Takt-Motoren des Offroad-Sektors sowie evt. die Motorräder als potenzielle Einsatzfelder für Alkylatbenzin identifiziert werden.

Über 98% der gesamten  $\text{NO}_x$ -Emissionen werden von Motorfahrzeugen und Offroad-Dieselmotoren erzeugt (Figur 3 C). Auch wenn Alkylatbenzin ein erwähnenswertes Reduktionspotenzial der  $\text{NO}_x$ -Emissionen aufweist (siehe Kapitel 5) können die gesamtschweizerischen  $\text{NO}_x$ -Emissionen durch den Einsatz von Alkylatbenzin im Offroad-Sektor nur geringfügig verringert werden. Mit 13  $\text{g kg}^{-1}$ , respektiv 12  $\text{g kg}^{-1}$ , sind die  $\text{NO}_x$ -Emissionen pro  $\text{kg}$  Treibstoffverbrauch der 4-Takt-Motorräder und der Offroad-Motoren etwa dreimal so hoch wie bei

3 Für die Berechnung von HC-Emissionen wird standardmässig die molekulare Masse des fiktiven Moleküls  $\text{CH}_{1.85}$  ( $13.85 \text{ g mol}^{-1}$ ) verwendet.

4 Für die Berechnung von  $\text{NO}_x$ -Emissionen wird standardmässig die molekulare Masse von  $\text{NO}_2$  ( $46 \text{ g mol}^{-1}$ ) verwendet.

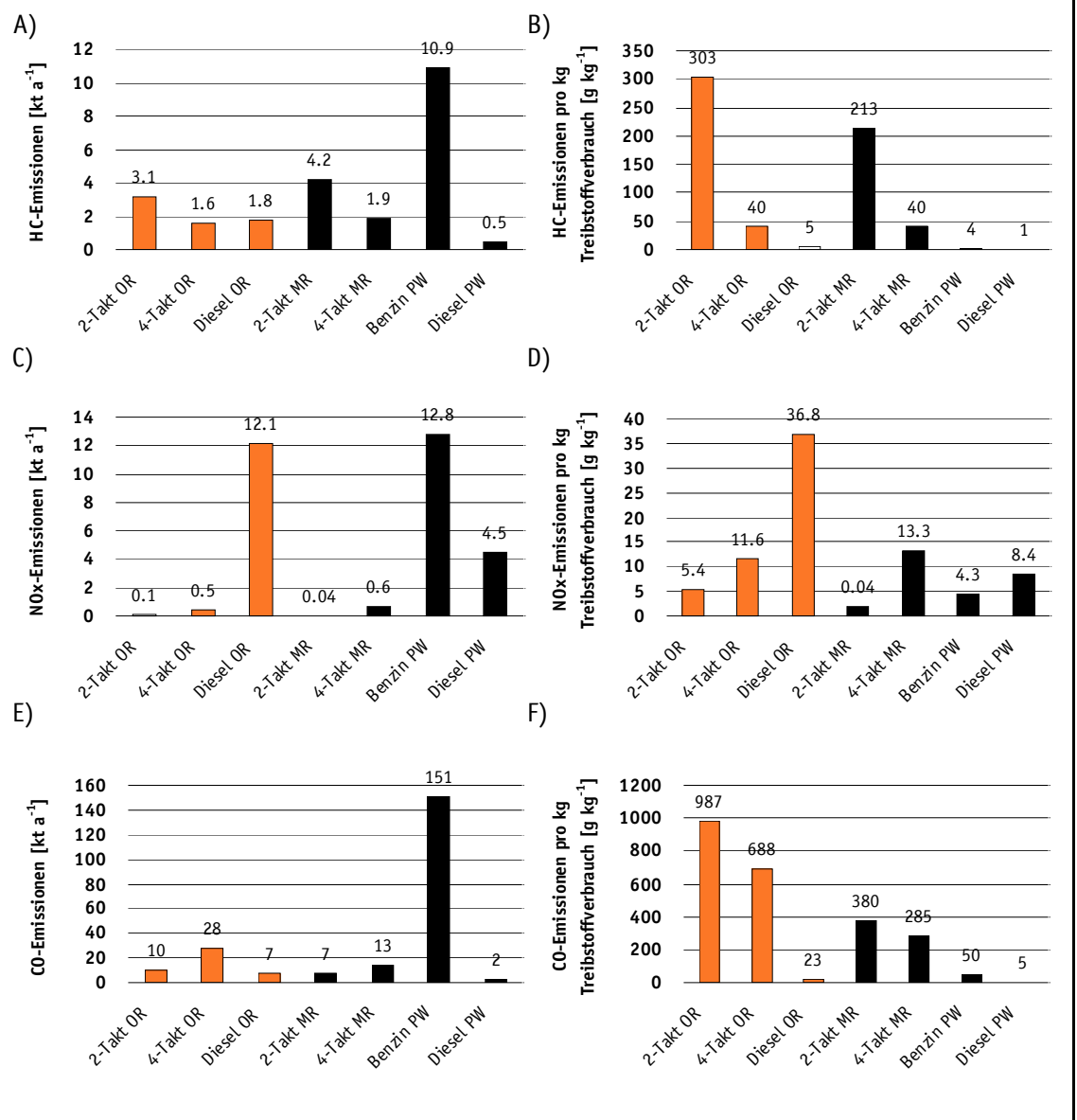
5 Nutzfahrzeuge nicht berücksichtigt.

6 Diese Werte beziehen sich auf die schweizerische Kleinmotorenflotte im Jahr 2005, welche auch Motoren älterer Baujahre beinhaltet.

Personenwagen (Figur 3 D). Auch die 2-Takt-Offroad-Motoren weisen mit 8 g hohe  $\text{NO}_x$ -Emissionen pro kg Treibstoffverbrauch auf. Unter der Annahme, dass Alkylatbenzin die  $\text{NO}_x$ -Emissionen reduziert (siehe Kapitel 5) können die  $\text{NO}_x$ -Emissionen mit Alkylatbenzin am effizientesten im Offroad-Sektor sowie bei den 4-Takt-Motorrädern verringert werden.

Die CO-Emissionen gehen zu 79% auf das Konto des motorisierten Strassenverkehrs, wobei die Personenwagen mit 151 Tonnen CO den grössten Anteil tragen (Figur 3 E). An zweiter Stelle folgen jedoch mit 28 Tonnen CO die 4-Takt-Motoren des Offroad-Sektors. Auf Diesel- und 2-Takt-Motoren entfallen gemeinsam noch rund 10% der gesamten CO-Emissionen. Mit über 500 g haben die Offroad-Motoren deutlich die höchsten CO-Emissionen pro kg Treibstoffverbrauch (Figur 3 F). Vorausgesetzt, dass mit Alkylatbenzin die CO-Emissionen reduziert werden können (siehe Kapitel 5), ist daher auch hier das grösste Reduzierungspotenzial im Offroad-Sektor zu erwarten.

### ABGASEMISSIONEN AUSGEWÄHLTER GRUPPEN VON VERBRENNUNGSMOTOREN IN DER SCHWEIZ (2005)



**Figur 3** Jährliche HC- (A), NO<sub>x</sub>- (C) und CO-Emissionen (E) sowie verbrauchsspezifische HC- (B), NO<sub>x</sub>- (D) und CO-Emissionen (F) des Offroad-Sektors und des Strassenverkehrs ohne dieselbetriebene Nutzfahrzeuge in der Schweiz (Bezugsjahr 2005). Die drei orange Säulen erschliessen den gesamten Offroad-Sektor (Infras, 2008), die vier schwarzen Säulen stellen den Strassenverkehr dar (BUWAL, 2004). OR steht jeweils für Offroad, MR für Motorräder und PW für Personwagen.



Anhand der Emissionen pro kg Treibstoffverbrauch können die folgenden Einsatzfelder für Alkylatbenzin identifiziert werden:

- › **2-Takt-Motoren des Offroad Sektors:** HC- und CO-Emissionen pro kg Treibstoff sind bei 2-Takt-Offroad-Motoren deutlich am höchsten. Entsprechend sind Massnahmen zur Reduktion der Emissionen in diesem Einsatzfeld am wirksamsten. Zudem sind Anwender im Offroad-Sektor den Abgasen der Verbrennungsmotoren direkt ausgesetzt. Deshalb ist hier eine Reduzierung der Emissionen besonders wünschenswert. Des Weiteren sind die Betriebsstunden und der Benzinverbrauch im Vergleich zum Strassenverkehr gering. Die Akzeptanz der Mehrkosten für Alkylatbenzin dürfte daher in Anbetracht der zahlreichen Vorteile (Kapitel 3.2) hier am höchsten sein. Insbesondere sind kleine 2-Takt-Motoren potenzielle Einsatzfelder, da die Treibstoffverbrennung, im Vergleich zu den 4-Takt-Motoren, unvollständig verläuft, was zu besonders hohen HC-Emissionen führt (Figur 3 B).
- › **4-Takt-Motoren des Offroad Sektors:** Die HC-Emissionen pro kg Treibstoff sind bei den 4-Takt-Offroad-Motoren rund 7½-mal kleiner als bei den 2-Takt-Offroad-Motoren. Die NO<sub>x</sub>-Emissionen pro kg Treibstoff sind jedoch fast 50% höher als bei den 2-Takt-Motoren. Zudem sind auch die CO-Emissionen pro kg Treibstoff mit rund 690 g kg<sup>-1</sup> sehr hoch. Entsprechend können mit technischen Massnahmen bei 4-Takt-Motoren HC- und CO-Emissionen effizient reduziert werden. Bei 4-Takt-Motoren rechtfertigen die zahlreichen Vorteile (Kapitel 3.2) von Alkylatbenzin Mehrkosten, weshalb 4-Takt-Motoren ebenfalls zu den potenziellen Einsatzfeldern von Alkylatbenzin zählen.
- › **2-Takt-Motorräder:** 2-Takt-Motorräder weisen nach den 2-Takt-Offroad-Motoren die höchsten HC-Emissionen pro kg Treibstoffverbrauch auf. Aus lufthygienischen Gründen wären 2-Takt-Motorräder daher erwünschenswerte Einsatzfelder für Alkylatbenzin. Die Vorteile von Alkylatbenzin kommen jedoch bei Motorrädern nur beschränkt zur Geltung. Der Fahrer ist den Abgasen nicht direkt ausgesetzt und Lagerzeiten sind häufig viel kürzer als bei Kleingeräten. Daher dürfte die Akzeptanz der Mehrkosten von über 150% (Stand Januar 2008) für Alkylatbenzin gegenüber herkömmlichem Benzin eher gering sein. Des Weiteren dürften 2-Takt-Motorräder mit der Verschärfung der Abgasnorm in Zukunft aus dem Markt verschwinden.
- › **4-Takt-Motorräder:** 4-Takt-Motorräder weisen nach den Offroad-Dieselmotoren die höchsten NO<sub>x</sub>-Emissionen pro kg Treibstoffverbrauch auf. Deren absoluter Anteil an den gesamtschweizerischen NO<sub>x</sub>-Emissionen ist jedoch marginal. Die Akzeptanz der Mehrkosten für Alkylatbenzin dürfte in Anbetracht der geringen Vorteile für den Benutzer auf wenig Akzeptanz stossen.

› **Motorräder im Allgemeinen:** Motorräder sind aus praktischen Gründen keine primären Einsatzfelder. Für eine schweizweite Verteilung von Alkylatbenzin müsste die Infrastruktur erst aufgebaut werden. Tankstellenbetreiber zeigen jedoch wenig Interesse Alkylatbenzin anzubieten. Finanzielle Anreize (z.B. verringerte Mineralölsteuer) könnten jedoch die Attraktivität von Alkylatbenzin in diesem Sektor erhöhen. Ein Gebot Motorräder mit Alkylatbenzin zu betreiben ist praktisch nicht durchsetzbar.

Im Folgenden konzentrieren wir uns daher auf die potenziellen Einsatzfelder im Offroad-Sektor. Die 2-Takt-Motorräder werden zu Vergleichszwecken jedoch in der weiteren Untersuchung jeweils berücksichtigt.

### 4.3. BESTAND, BETRIEBSDAUER UND TREIBSTOFFVERBRAUCH DER POTENZIELLEN EINSATZFELDER

#### 4.3.1. VERBRENNUNGSMOTOREN DIFFERENZIERT NACH EINSATZBEREICHEN

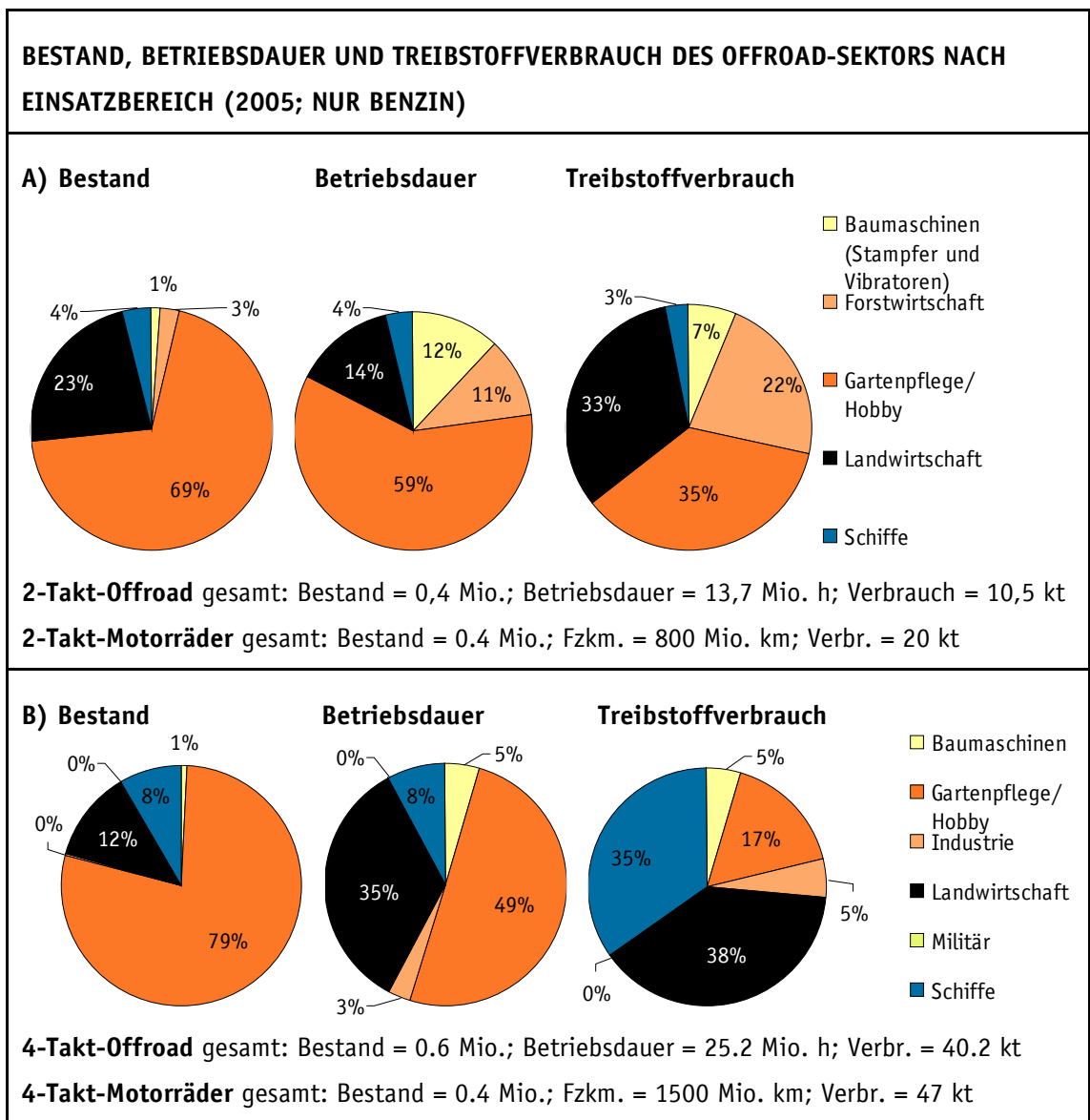
Heute wird Alkylatbenzin vor allem dort eingesetzt, wo der Benutzer den Abgasen eines Verbrennungsmotors direkt ausgesetzt ist. Im Folgenden werden das Mengengerüst, die Betriebszeit und der Treibstoffverbrauch potenzieller Einsatzfelder nach Nutzungsbereichen analysiert. Wie oben dargelegt, sind die wichtigsten Einsatzfelder für Alkylatbenzin Benzinmotoren des Offroad-Sektors, insbesondere Kleingeräte, die in der Forstwirtschaft und in der Gartenpflege zum Einsatz kommen. Im Folgenden werden sämtliche Bestände, Betriebsdauern und Treibstoffverbräuche der Verbrennungsmotoren (exkl. Dieselmotoren) des Offroad-Sektors gemäss Offroad-Datenbank des BAFU (Infras, 2008) erörtert (siehe auch Annex 2; Tabelle 11 und 12).

Im Schweizer Offroad-Sektor gibt es über eine Million benzinbetriebener Verbrennungsmotoren, wovon rund 41% 2-Takt-Motoren sind. Die überwiegende Mehrheit (69%) dieser 2-Takt-Motoren wird für private und professionelle Gartenpflege eingesetzt (Figur 4 A). Obwohl die spezifische Betriebsdauer einzelner Gartengeräte eher gering ist, machen die Geräte in der Gartenpflege mit über 59% den höchsten Anteil der jährlichen Betriebsdauer des Offroad-Sektors aus. Der Treibstoffverbrauch der 2-Takter verteilt sich grösstenteils auf die Forstwirtschaft, die Gartenpflege und die Landwirtschaft. 2-Takt-Motoren von Baumaschinen und Schiffen verbrauchen etwa 9% des totalen 2-Takt-Benzinverbrauchs des Offroad-Sektors.

Die 2-Takt-Motorräder verbrauchen jährlich 20 kt Benzin. Dies ist etwa das Doppelte des Benzinverbrauchs des gesamte 2-Takt-Offroad-Sektors (siehe Figur 2 D).

Bei den 4-Takt-Motoren zeichnet sich ein etwas differenzierteres Bild ab. In der Gartenpflege ist zwar sowohl der Bestand als auch die Betriebsdauer aller 4-Takt-Motoren am höchsten (Figur 4 B). Beim Treibstoffverbrauch dagegen liegt die Landwirtschaft mit einem Anteil von 38% des Gesamtverbrauchs an erster Stelle. Mit 35% ist der Verbrauch von 4-Takt-Benzin in der Schifffahrt nach der Landwirtschaft am zweithöchsten. Die Gartenpflege macht rund 17% des gesamten 4-Takt-Benzinverbrauchs im Offroad-Sektor aus.

Die 4-Takt-Motorräder verbrauchen jährlich 47 kt Benzin. Dies ist etwa 18% mehr als der 40 kt Benzinverbrauch aller 4-Takt-Motoren des Offroad-Sektors (siehe Figur 2 D).



**Figur 4** Prozentuelle Gliederung des Bestandes (linke Figur), der jährlichen Betriebsdauer (mittlere Figur) und des jährlichen Treibstoffverbrauchs (rechte Figur) der benzinbetriebenen 2-Takt (A) und 4-Takt (B) Verbrennungsmotoren des Offroad-Sektors in der Schweiz (Stand 2005). Daten nach Infras (2008). Zu Vergleichszwecken sind die Bestände, jährlichen Fahrkilometer und Treibstoffverbräuche der Motorräder angegeben.

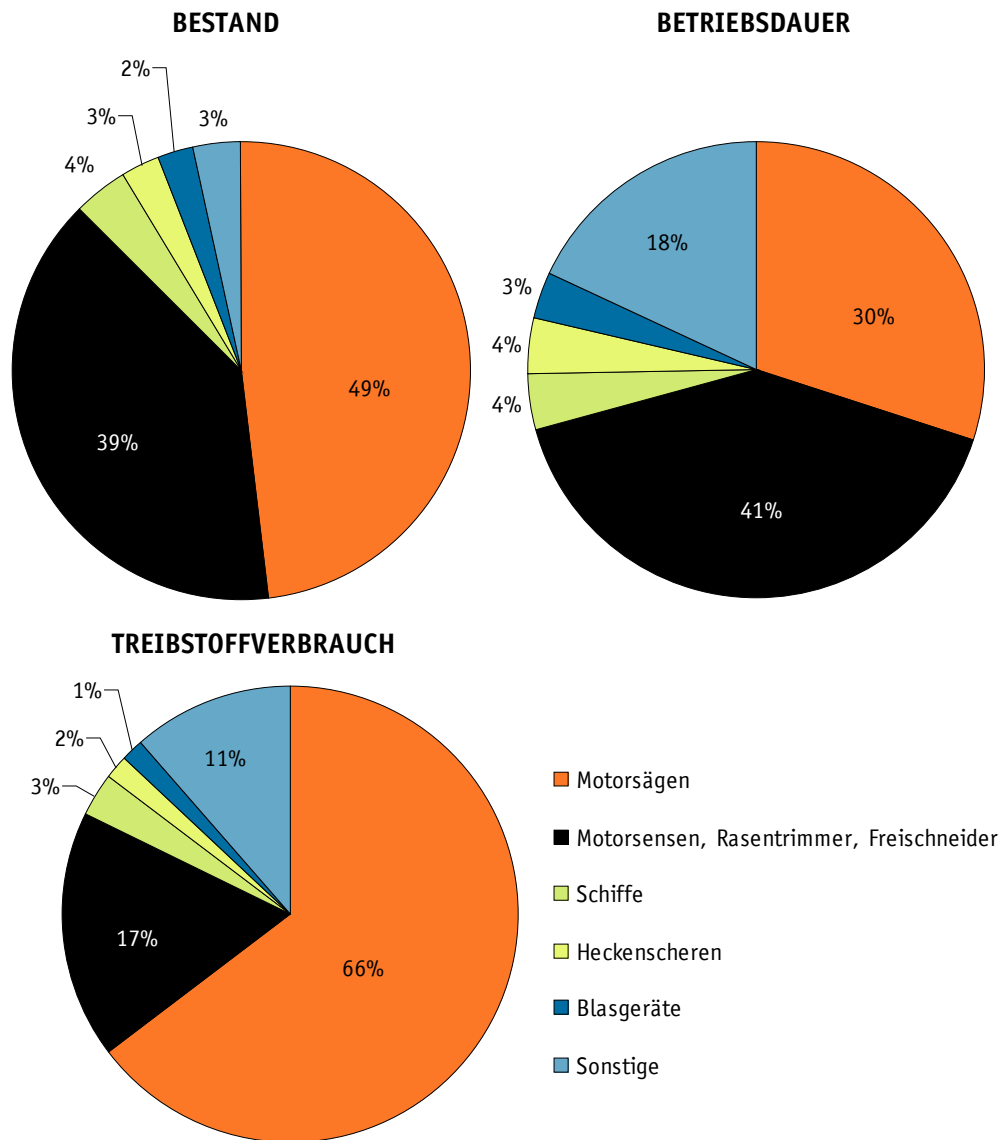
#### 4.3.2. 2-TAKT-MOTOREN DIFFERENZIERT NACH GERÄTETYPEN

Da 2-Takt-Motoren die höchsten HC- und CO-Emissionen pro kg Treibstoff aufweisen, wird im Folgenden deren Bestand, Betriebsdauer und Treibstoffverbrauch nach Gerätetypen erörtert. Der Bestand der 2-Takt-Motoren im Offroad-Sektor wird zu rund 49% von Motorsägen dominiert (Figur 5). Mit 39% des Gesamtbestandes sind die Motorsensen, Rasentrimmer und Freischneider die zweitwichtigste Gerätegruppe. Diese beiden Gerätegruppen weisen auch

die längsten Betriebszeiten auf. Gut 71% der totalen Betriebsstunden aller Offroad 2-Takt-Motoren gehen auf das Konto von Motorsägen, Motorsensen, Rasentrimmern und Freischneidern. Zusammen verbrauchen diese beiden Gerätegruppen über 83% des gesamten 2-Takt-Benzinverbrauchs im Offroad-Sektor. Der Verbrauch der Schiffe, Heckenscheren, Blaskgeräte und anderer Kleinmotoren ist dagegen weniger bedeutend.

Die hohen Betriebsstunden und der hohe Treibstoffverbrauch machen Motorsägen, Motorsensen, Rasentrimmer und Freischneider zum Haupteinsatzfeld für Alkylatbenzin. Beim Bedienen dieser Geräte ist der Anwender den Abgasen direkt ausgesetzt. Insbesondere wird Alkylatbenzin im professionellen Gebrauch geschätzt, da dort die Betriebszeiten rund 25-mal länger als im privaten Gebrauch sind. Typischerweise ist z.B. eine Motorsäge im professionellen Sektor jährlich rund 150 Stunden im Einsatz (siehe Annex 2). Im privaten Sektor wird die Motorsäge nur etwa sechs Stunden pro Jahr gebraucht. Ähnlich sieht die Situation bei den Motorsensen, Rasentrimmern und Freischneidern aus, welche im professionellen Sektor jährlich rund 600 Stunden und im privaten Sektor rund sechs Stunden im Einsatz sind. Da Anwender dieser Kleingeräte den Abgasen direkt ausgesetzt sind, verwenden viele Forstvereine und Gärtnereien für den Betrieb ihrer Verbrennungsmotoren wegen der gesundheitlichen und betrieblichen Vorteile (Kapitel 3.2) ausschliesslich Alkylatbenzin.

### BESTAND, BETRIEBSDAUER UND TREIBSTOFFVERBRAUCH DER 2-TAKT-MOTOREN NACH GERÄTETYPEN (2005)



Gesamt: Bestand = 0.4 Mio.; Betriebsdauer = 13.8 Mio. h; Verbrauch = 10.5 kt

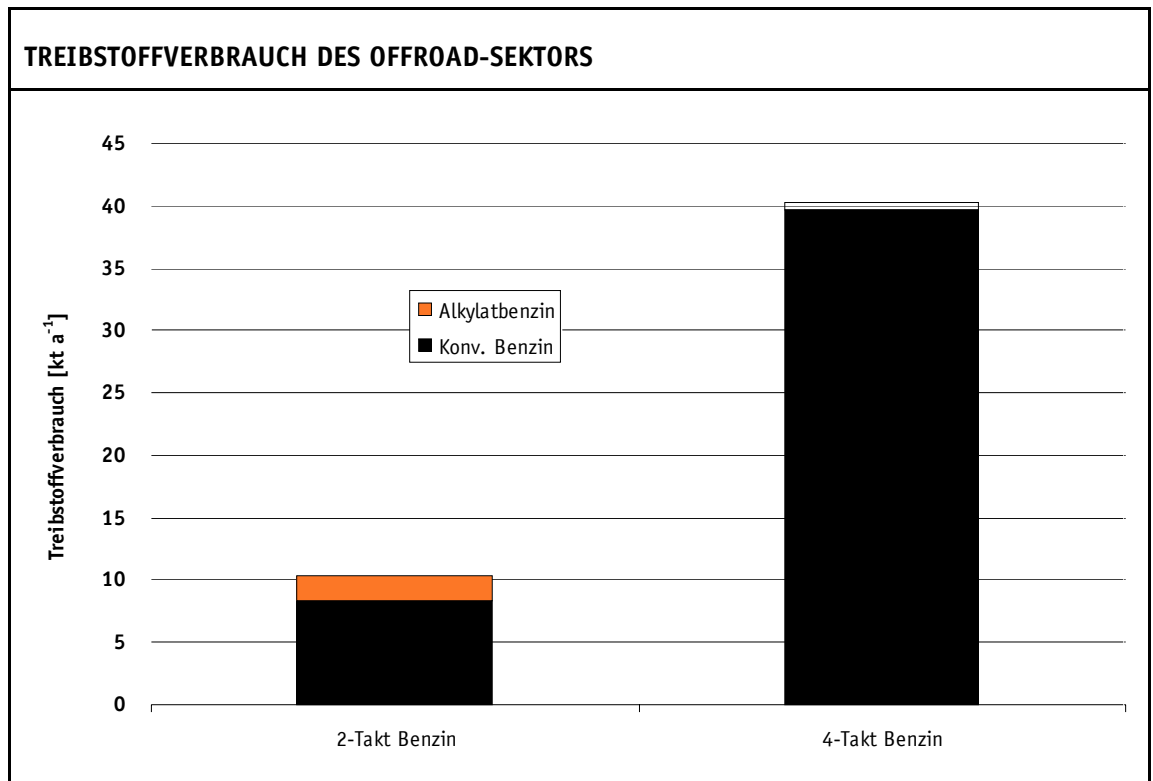
**Figur 5** Prozentuelle Gliederung des Bestandes (linke obere Figur), der Betriebsdauer (rechte Figur) und des Treibstoffverbrauchs (untere Figur) aller 2-Takt-Motoren des Offroad-Bereichs in der Schweiz (Stand 2005). Daten nach Infrac (2008). Unter ‚Sonstige‘ sind folgende Geräte zusammengefasst: Bohrgeräte, Freischneidegeräte, Stampfer, Vibratoren handgeführt, Trennschleifgeräte und andere Kleingeräte.

#### 4.4. ABSATZ DES ALKYLATBENZINS

Alkylatbenzin wurde in Skandinavien entwickelt und wird vor allem in den skandinavischen Ländern und in den Beneluxländern eingesetzt. In Mitteleuropa war die Schweiz bis vor einigen Jahren Vorreiter. Auch heute ist der Absatz von Alkylatbenzin in der Schweiz sehr hoch, jedoch deutlich geringer als in Schweden, den Beneluxländern oder Deutschland. Zum einen ist Alkylatbenzin der Bevölkerung noch weitgehend unbekannt und zum anderen ist der Preis von bis zu 5.20 CHF pro Liter um bis zu 40% höher als zum Beispiel in Deutschland. Durch Umfragen und Interviews schätzen wir, dass etwa 5% aller 2-Takt-Geräte in der Gartenpflege mit Alkylatbenzin betrieben werden. Weit verbreitet ist Alkylatbenzin vor allem in der Forstwirtschaft. Da viele Forstvereine ausschliesslich mit Alkylatbenzin arbeiten wird der Anteil hier auf 80% geschätzt.

Der Nutzen von Alkylatbenzin ist bei 4-Takt-Motoren geringer, weshalb auch der Anteil von 4-Takt-Alkylatbenzin am Gesamtabsatz wesentlich geringer sein dürfte. Aufgrund der Umfragen schätzen wir den Anteil von 4-Takt-Alkylatbenzin in der Gartenpflege auf 5% und in der Landwirtschaft auf 2%. Wegen des hohen Preises stufen wir den Absatz von Alkylatbenzin im Strassenverkehr und in der Schifffahrt als bedeutungslos ein.

Aufgrund dieser Annahmen schätzen wir den gesamtschweizerische Absatz von Alkylatbenzin auf 2'000 Tonnen 2-Takt und 650 Tonnen 4-Takt-Benzin. Bei einer Dichte von 680 bis 720 kg m<sup>-3</sup> (SMU, 2006) entspricht dies rund 3 Millionen Liter 2-Takt-Benzin und etwa 1 Million Liter 4-Takt-Benzin. Im Vergleich zum gesamten Offroad-Sektor entspricht dies 19% des 2-Takt und 2% des 4-Takt-Benzinverbrauchs (Figur 6). Dementsprechend beträgt der Marktanteil von Alkylatbenzin im Schweizer Offroad-Benzinmarkt etwa 5%.



**Figur 6** Jährlicher Treibstoffverbrauch aller Verbrennungsmotoren (ohne motorisierten Strassenverkehr). Der Anteil an Alkylatbenzin (Orange Farbe) wurde anhand von Befragungen von Nutzern, Importeuren und Herstellern geschätzt. Der totale Treibstoffverbrauch wird in Infrac (2008) beschrieben.



## 5. EMISSIONSMINDERUNG DURCH ALKYLATBENZIN

Im folgenden Kapitel wird das Potenzial der Emissionsminderung durch den Einsatz von Alkylatbenzin bei verschiedenen Kleingeräten sowie 2-Takt-Motorrädern aufgezeigt und analysiert. Da Alkylatbenzin einen kleinen Anteil an aromatischen Kohlenwasserstoffen enthält (Kapitel 3.3), können besonders schädliche Emissionen durch den Einsatz von Alkylatbenzin reduziert werden. Basierend auf Vergleichsmessungen wird im folgenden Kapitel das Reduktionspotenzial spezifischer Emissionskomponenten quantifiziert. Die Wiederholgenauigkeit einer Messung mit gleichem Motor, demselben Prüfer und gleichem Messgerät liegt bei etwa 20% (EMPA, 2004). Dies muss bei der Interpretation der Reduktionspotenziale berücksichtigt werden. Ebenfalls wird im folgenden Kapitel die zeitliche Entwicklung der Emissionsfaktoren durch Fortschritte in der Verbrennungsmotortechnologie im Offroad-Sektor dargestellt und dem Reduktionspotenzial von Alkylatbenzin gegenübergestellt.

### 5.1. REDUKTIONSPOTENZIAL DER EMISSIONEN DURCH ALKYLATBENZIN

Als vor zirka 10 Jahren das erste kommerzielle Alkylatbenzin auf den Markt kam, wurden an verschiedenen Verbrennungsmotoren die Emissionen beim Einsatz von herkömmlichem Benzin und Alkylatbenzin gemessen (EMPA, 1997; Mayer et al., 1999; Stadler et al., 1999; BNM-Research, 2000; Christensen et al., 2001; EMPA, 2001; Czerwinski et al., 2005). Die damaligen Messungen bilden die Grundlage, um die Emissionsminderung durch den Einsatz von Alkylatbenzin zu quantifizieren. Im Folgenden definieren wir das Reduktionspotenzial RP für einzelne Schadstoffkomponenten wie folgt:

$$RP = \frac{E_{i,Q} - E_{i,konv.Benzin}}{E_{i,konv.Benzin}}$$

wobei der Index ‚i‘ den jeweiligen Luftschadstoff bezeichnet und Q die Messung mit Alkylatbenzin bezeichnet<sup>7</sup>. Entsprechend bedeutet ein negativer RP-Wert eine Reduktion und ein positiver RP-Wert eine Zunahme der Emissionen infolge des Einsatzes von Alkylatbenzin. Zudem ist zu beachten, dass in Messungen vor dem Jahr 2000, der Benzol-Gehalt in konven-

<sup>7</sup> Bei den 4-Takt Motoren wurde zudem das RP eines Katalysators analysiert.

tionellem Benzin etwa 3.5% betrug. Seit Januar 2000 ist der Benzolgehalt im Benzin für Verbrennungsmotoren jedoch europaweit auf 1% beschränkt.

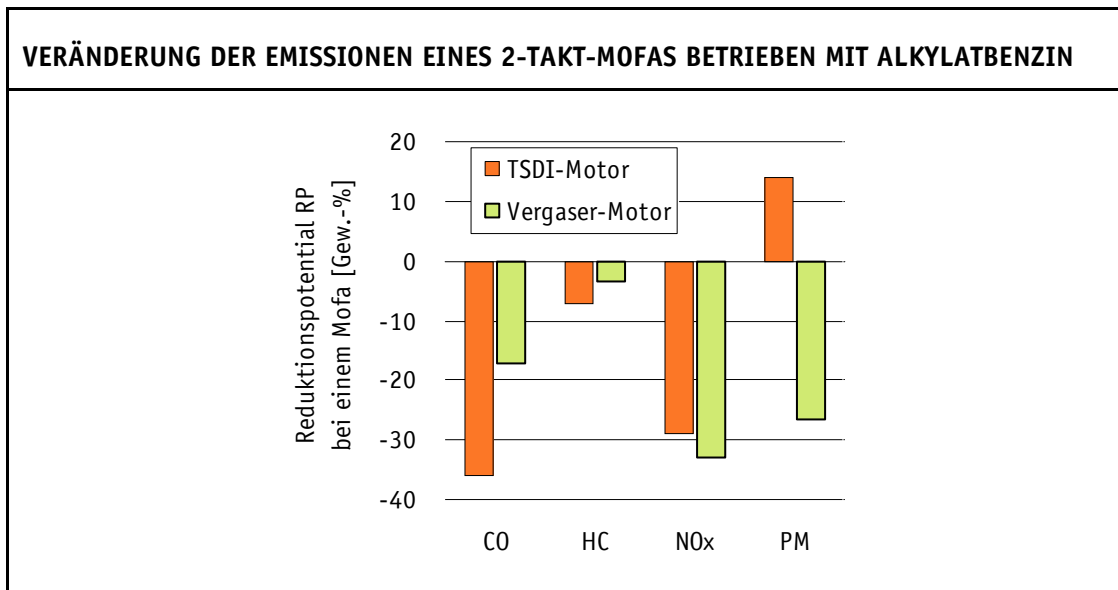
### 5.1.1. REDUKTIONSPOTENZIAL BEI 2-TAKT-MOTOREN

Bei 2-Takt-Motoren ist das Schmieröl in der Regel dem Treibstoff beigemischt und wird während des Arbeitstaktes verbrannt. Die Verbrennung des Treibstoffgemisches ist jedoch oft unvollständig, was zu hohen HC-Emissionen pro kg Treibstoffverbrauch führt (Figur 3). Dem entsprechend ist das Interesse des Reduktionspotenzials einzelner Emissionskomponenten durch den Einsatz von Alkylatbenzin bei 2-Takt-Motoren sehr hoch.

#### **Reduktionspotenzial am Beispiel eines Mofas (50 cm<sup>3</sup>; 3.6 kW)**

An der Berner Fachhochschule für Technik und Informatik in Nidau (BFH) wurden die Emissionen von 2-Takt-Mofas (je ein Modell mit Direkteinspritzung (TSDI) und ein Modell mit Vergaser) der Marke Peugeot (50 cm<sup>3</sup>; 3.6 kW) untersucht (Czerwinski et al., 2005). In Testversuchen wurden die Mofas jeweils mit konventionellem Benzin und mit Alkylatbenzin betrieben. Die Messungen zeigten, dass sich durch Alkylatbenzin die CO-, HC- und NO<sub>x</sub>-Emissionen beim TSDI-Motor um jeweils 36%, 7% und 29% reduzieren lassen (Figur 7). Beim Modell mit einem Vergaser ist das Reduktionspotenzial von NO<sub>x</sub> höher (33%) und von CO (17%) und HC (3%) tiefer als beim TSDI. Reduktionspotenziale unter 20% sind fraglich, da die Messgenauigkeit der Emissionen bei zirka 20% liegt (EMPA, 2004).

Während der Einsatz von Alkylatbenzin die PM-Emissionen beim TSDI-Modell um 14% erhöht, verringerten sich diese beim Modell mit Vergaser um zirka 27%. Grundsätzlich sind die PM-Emissionen von Benzingeräten im Vergleich zu Dieselgeräten gering. Bei TSDI-Modellen führt der hohe Einspritzdruck zu einem Anstieg der PM-Emissionen. Es ist jedoch unwahrscheinlich, dass der registrierte Anstieg von PM auf das Alkylatbenzin zurückzuführen ist. Möglicherweise ist der Effekt auf Messungenauigkeit, möglicherweise auf Öl-Bestandteile zurückzuführen.

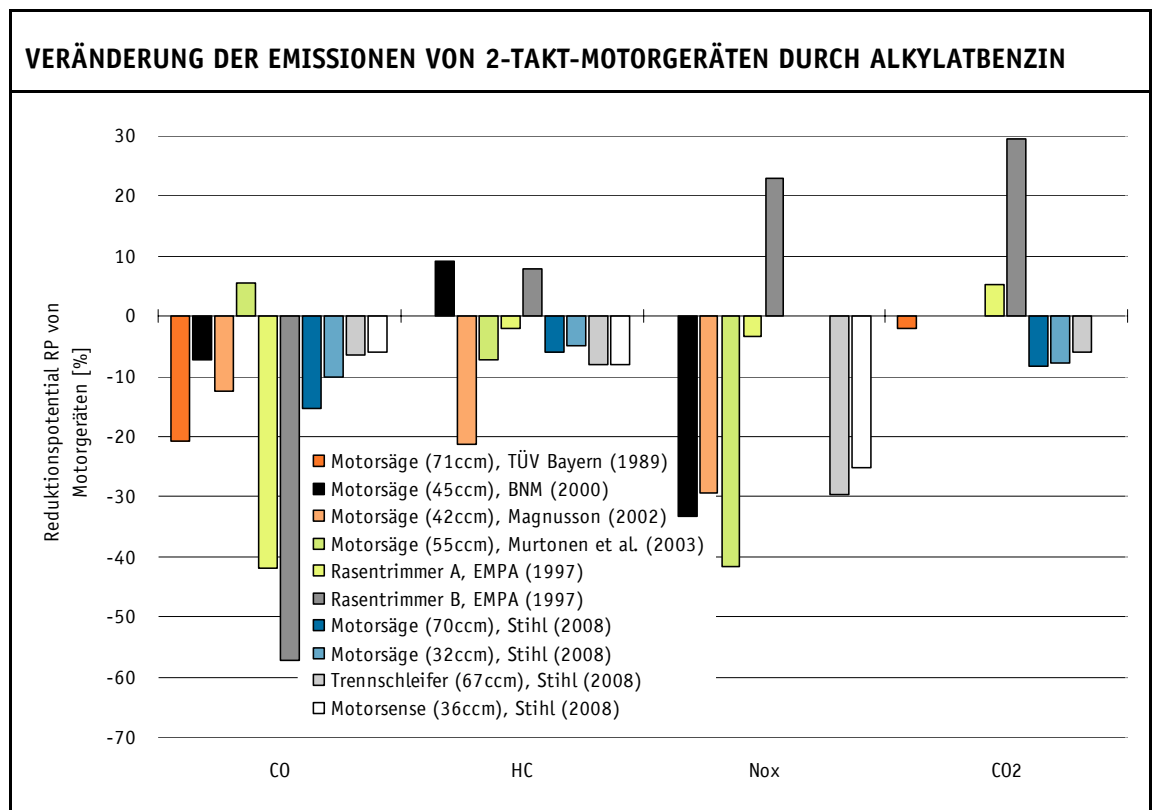


**Figur 7** Reduktionspotenzial der Emissionen eines Mofas mit Kraftstoffeinspritzung (Peugeot, Looxor TSDI) und eines Mofas mit Vergaser (Peugeot) betrieben mit Alkylatbenzin gegenüber dem Betrieb mit herkömmlichem Benzin. Daten aus Czerwinski et al. (2005). Die absoluten Emissionswerte der Messungen sind im Annex 3 aufgelistet.

### Reduktionspotenzial bei 2-Takt-Motorgeräten (<71 cm<sup>3</sup>)

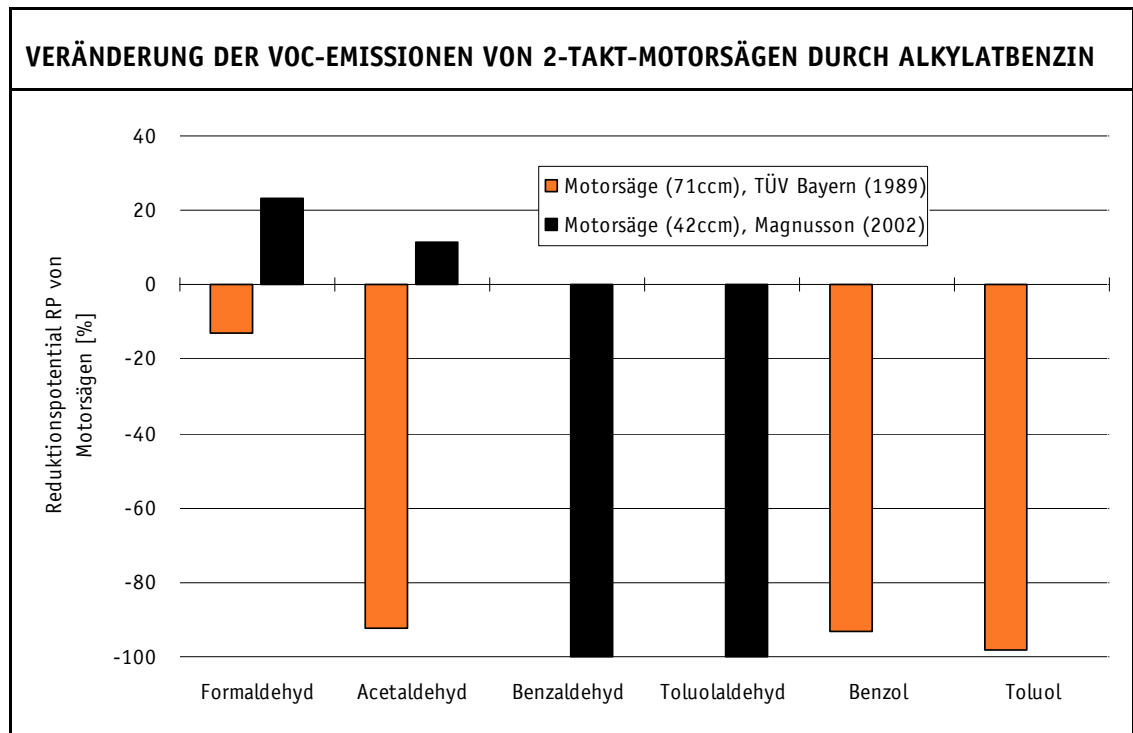
Mehrere unabhängige Studien haben das Reduktionspotenzial von Alkylatbenzin in 2-Takt-Motorgeräten untersucht (TÜV-Bayern, 1989; EMPA, 1997; BNM-Research, 2000; Magnusson, 2002; Murtonen and Nylund, 2003; Stihl, 2008). Insgesamt wurden sechs Motorsägen (Hubraum: 42 bis 71 cm<sup>3</sup>; Leistung: 2.3 bis 5.6 kW), zwei Rasentrimmer (~0.4 kW), ein Trennschleifer (66.7 cm<sup>3</sup>; 4.4 kW) und eine Motorsense (36.3 cm<sup>3</sup>; 1.9 kW) untersucht. Die Messungen zeigen übereinstimmend (bis auf eine Ausnahme), dass bei der Verwendung von Alkylatbenzin die NO<sub>x</sub>-Emissionen um durchschnittlich rund 30% reduziert werden (Figur 8). Sowohl CO- als auch HC-Emissionen werden in den meisten Versuchen durch Alkylatbenzin im Vergleich zu herkömmlichem Benzin um 5 bis 10% verringert. Einzelne Messungen deuten auch auf eine Zunahme von CO- (Murtonen and Nylund, 2003), bzw. HC-Emissionen (BNM-Research, 2000) durch den Einsatz von Alkylatbenzin hin. Da es sich dabei um Einzelmessungen handelt und jeweils eine gegenläufige Tendenz zwischen CO- und HC-Emissionen ausgewiesen wird, handelt es sich hierbei wahrscheinlich um Messungenauigkeiten. Eine Messung aus dem Jahr 1997 deutet auf eine Zunahme der CO<sub>2</sub>-Emissionen durch den Einsatz von Alkylatbenzin hin (EMPA, 1997). Neuere Messungen von Stihl (2008) zeigen jedoch, dass die CO<sub>2</sub>-Emissionen durch Alkylatbenzin in modernen Geräten eher verringert werden können (wenn auch nur um wenige Prozentpunkte).

Des Weiteren muss beachtet werden, dass die Abgastechnologie sich seit den ersten Untersuchungen Ende der 80er Jahre kontinuierlich verbessert hat und somit das Abgasniveau aller Schadstoffe verringert wurde. Diese zeitliche Entwicklung wird in Kapitel 5.2 diskutiert.



**Figur 8** Reduktionspotenzial der Emissionen von 6 Motorsägen, 2 Rasentrimmer, einem Trennschleifer und einer Motorsense beim Betrieb mit Alkylatbenzin gegenüber dem Betrieb mit konventionellem Benzin. Details zu den Geräten und absolute Emissionswerte der Messungen sind im Annex 3 aufgelistet.

Neben den regulierten Schadstoffen haben TÜV Bayern (1989) und Magnusson (2002) den Effekt von Alkylatbenzin auf VOC-Emissionen bei Motorsägen untersucht (Figur 9). Die Messresultate zeigen übereinstimmend, dass durch den Einsatz von Alkylatbenzin Emissionen von aromatischen Kohlenwasserstoffe (z.B. Benzol, Toluol) um über 90% abnehmen. Während die Messungen von TÜV Bayern auf eine Abnahme von Formaldehyd und Acetaldehyd hindeuten, stellt Magnusson eine geringe Zunahme von Aldehyd-Emissionen fest (Figur 9).



**Figur 9** Reduktionspotenzial der VOC-Emissionen von 2 Motorsägen beim Betrieb mit Alkylatbenzin gegenüber dem Betrieb mit konventionellem Benzin. Details zu den Geräten und absoluten Emissionswerte der Messungen sind im Annex 3 aufgelistet.

### Einfluss von Ethanolbeimischung in den Treibstoff

Seit einigen Jahren wird in den USA und Europa die Beimischung von Ethanol in herkömmliches Benzin diskutiert und praktiziert. Messungen zeigen, dass bei der Verwendung von Ethanol-Benzin-Mischungen in 2-Takt-Motoren deutlich mehr Formaldehyd und Acetaldehyd-Emissionen produziert werden als mit herkömmlichen Benzin oder Alkylatbenzin (Magnusson 2002). Da in vielen europäischen Ländern Ethanol flächendeckend dem herkömmlichen Benzin beigemischt wird, könnte Alkylatbenzin in Zukunft auch Vorteile bei den Formaldehyd- und Acetaldehyd-Emissionen aufweisen.

### 5.1.2. REDUKTIONSPOTENZIAL BEI 4-TAKT-MOTOREN

Der Vorteil des 4-Takt-Motors gegenüber dem 2-Takt-Motor ist ein geordneter Gaswechsel durch die Trennung von Frischgas und Abgas, was zu einem geringeren Treibstoffverbrauch und besserem Abgasverhalten führt. Im Gegensatz zum 2-Takt-Motor wird das Schmieröl im 4-Takt-Motor nicht verbrannt, was die Abgase zusätzlich verringert. Entsprechend sind die Abgase eines 4-Takt-Motors im Vergleich zu einem 2-Takt-Motor geringer. Dennoch ist auch

beim 4-Takt-Motor das Reduktionspotenzial einzelner Emissionskomponenten durch den Einsatz von Alkylatbenzin gross.

### **Reduktionspotenzial bei einem Motormäher (479 cm<sup>3</sup>; 8-10 kW)**

Mayer et al. (1999), Stadler et. al. (1999) und die EMPA (2001) haben die Emissionen eines Motormähers<sup>8</sup> der Marke RAPID (479 cm<sup>3</sup>; 8-10 kW) bei Betrieb mit konventionellem Benzin und Alkylatbenzin untersucht. Da alle drei Studien auf Messungen mit dem gleichen Gerät beruhen, beschränken wir uns hier auf die Resultate der EMPA (2001)<sup>9</sup>. Neben den Messungen mit konventionellem Benzin und Alkylatbenzin wurden zudem die Emissionen bei Betrieb mit Katalysator untersucht. Sämtliche Messungen wurden unter Teillast (zirka 75% der Volllast) durchgeführt. In einer Reihe von Messversuchen wurden neben den üblichen Abgaskomponenten (NO<sub>x</sub>, CO und HC) auch detaillierte Untersuchungen der VOCs in den Abgasen durchgeführt. Die Resultate der Messversuche mit dem Motormäher sind in Annex 4 (Tabelle 15) zusammengefasst.

Die Messungen zeigen, dass sich durch den Einsatz von Alkylatbenzin insbesondere die VOC- (n-Hexan, Benzol, Toluol, Ethylbenzol, Xylole) und NO<sub>x</sub>-Emissionen reduzieren lassen (Figur 10). Während n-Hexan, Benzol, Toluol, Ethylbenzol und Xylole beim Einsatz von Alkylatbenzin um über 90% abnehmen, nehmen die Emissionen von Formaldehyd, Acetaldehyd und 1,3-Butadien hingegen gegenüber dem herkömmlichen Benzin um über 60% zu. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Messungen unter Teillast durchgeführt wurden. Dadurch werden Aldehyd-Emissionen begünstigt. Zudem sind moderne 4-Takt Kleinmotoren häufig mit einem Katalysator ausgestattet, welcher die Aldehyd-Emissionen effizient verringern kann (siehe unten). Aus gesundheitlichen Gründen gilt es insbesondere Benzol-Emissionen zu verringern (Tabelle 3).

Insgesamt verringert Alkylatbenzin die PAK-Emissionen um zirka 70% und die NO<sub>x</sub>-Emissionen um bis zu 30%. Bei den CO- und den totalen HC-Emissionen konnte jedoch kein Trend festgestellt werden, da die Reduktion unter der Messgenauigkeit lag. Die Messungen zeigen jedoch, dass Formaldehyd und Acetaldehyd sich beim Einsatz von Alkylatbenzin verdoppeln. Dieser Umstand erklärt, warum sich die HC-Emissionen nicht verändern, obwohl n-Hexan, Benzol, Toluol, Ethylbenzol und Xylole beim Einsatz von Alkylatbenzin um über 90% abnehmen.

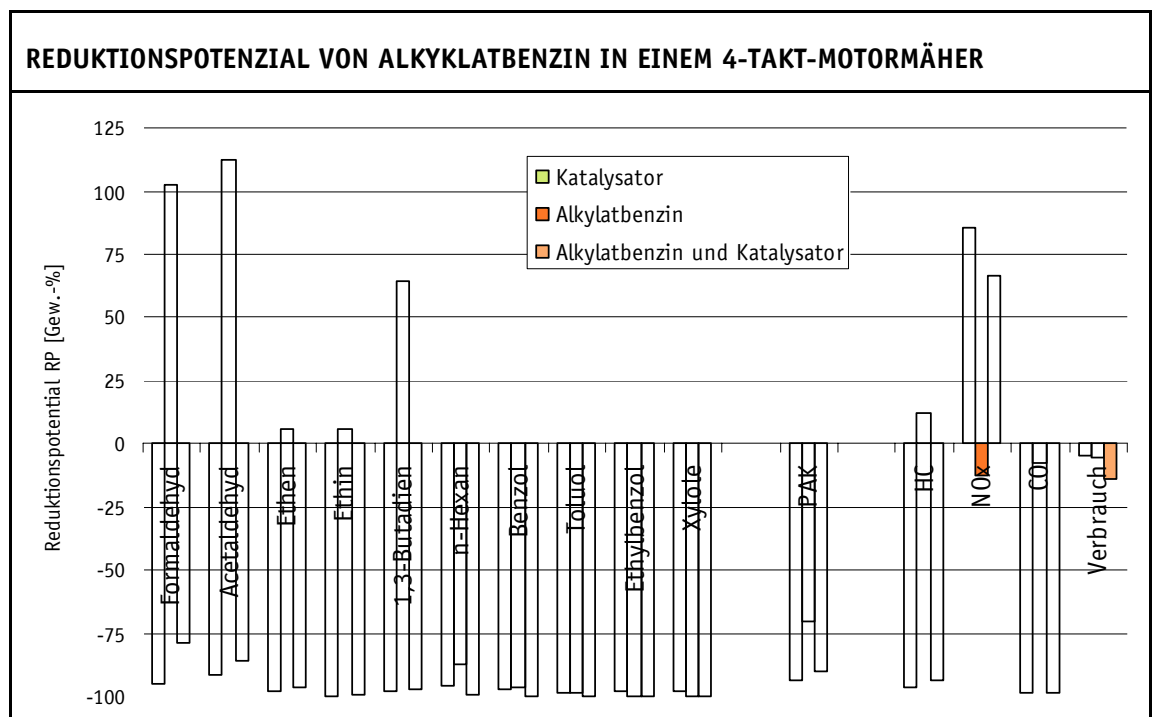
<sup>8</sup> In der Offroad-Datenbank des BAFU (Infras, 2008) wird der Motormäher unter dem Begriff *Einachsmäher* geführt.

<sup>9</sup> Die Resultate der anderen Studien weichen unwesentlich von den Resultaten der EMPA ab und können im Annex 4 (Tabelle 15) dieses Berichtes konsultiert werden.

Die Messungen mit Katalysator zeigen, dass sämtliche VOCs im Vergleich zum Betrieb ohne Katalysator um über 90% reduziert werden. Von allen gemessenen Abgaskomponenten werden nur die  $\text{NO}_x$ -Emissionen erhöht. Im Vergleich zum Alkylatbenzin ist das Reduktionspotenzial des Katalysators beim Motormäher deutlich höher.

Durch die gleichzeitige Anwendung eines Katalysators und Alkylatbenzin können ebenfalls sämtliche VOCs gegenüber dem Betrieb mit konventionellem Benzin und ohne Katalysator um über 75% reduziert werden. Die  $\text{NO}_x$ -Emissionen nehmen jedoch um zirka 70% zu, was auf den Katalysator zurückzuführen ist. Die absoluten Emissionen werden durch den gleichzeitigen Einsatz von Alkylatbenzin und Katalysator gegenüber herkömmlichem Benzin und Katalysator nur geringfügig verbessert.

Namentlich die Aussagen zur Benzol-Reduktion muss aus heutiger Sicht etwas relativiert werden, denn alle Benzol-Messungen wurden mit konventionellem Treibstoff mit einem Benzol-Gehalt von 3.7% durchgeführt. Heutiges Benzin verlangt einen Wert von max. 1%. Deshalb ist zu erwarten, dass der Benzolanteil im Abgas in der Vergleichsmessung geringer wäre. Durch Alkylatbenzin wäre noch immer eine Absenkung zu erwarten, das quantitative Ausmass der Reduktion dürfte aber geringer sein.



**Figur 10** Reduktionspotenzial der Emissionen eines Motormäher (RADIP, 8-10 kW, 4-Takt-Motor) beim Einsatz eines Katalysators, beim Betrieb mit Alkylatbenzin und beim gleichzeitigen Einsatz eines Katalysators und Alkylatbenzin gegenüber dem Betrieb mit konventionellem Benzin. Abgeleitet aus EMPA (2001). Die absoluten Emissionswerte der Messungen sind im Annex 4 aufgelistet.

**Reduktionspotenzial bei einem Rasenmäher (190 cm<sup>3</sup>; 2.9 kW)**

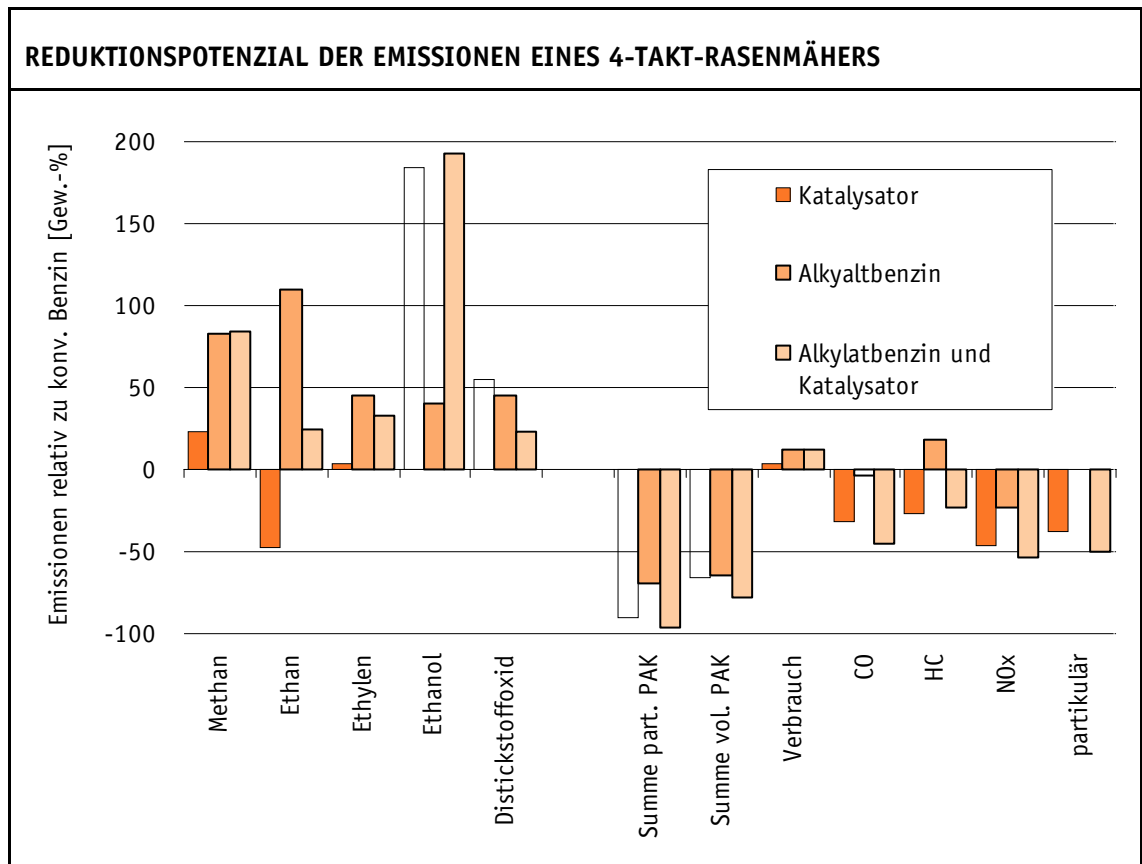
An der Universität Stockholm wurde in analogen Messreihen (Annex 4; Tabelle 16) das Reduktionspotenzial von Alkylatbenzin (OK Ultima) und eines Katalysator an einem Rasenmäher der Marke Dahlmans Klippo (190 cm<sup>3</sup>; 2.9 kW) bestimmt (Christensen et al., 2001). Die Messungen zeigen, dass durch den Einsatz von Alkylatbenzin die PAK-Emissionen um rund 70% verringert werden können, obwohl die gesamten HC-Emissionen sich um rund 18% erhöhen (Figur 11). Die CO- und NO<sub>x</sub>-Emissionen sind jeweils um zirka 3% (unterhalb der Messgenauigkeit), respektiv 32% tiefer als beim Einsatz von herkömmlichem Benzin. Zu den spezifischen VOC-Komponenten in den Abgasen machen die schwedischen Forscher nur Angaben zu Methan, Ethylen, Ethanol, Distickstoffoxid und PAKs, welche sich mit Ausnahme der PAKs beim Einsatz von Alkylatbenzin um über 40% erhöhen. Die grösstenteils karzinogenen PAKs können durch den Einsatz von Alkylatbenzin um über 60% reduziert werden.

Vergleichsmessungen mit herkömmlichem Benzin und einem Katalysator weisen ebenfalls auf ein grosses Reduktionspotenzial der PAK-, CO-, NO<sub>x</sub>-Emissionen hin. Im Gegensatz zu den Messungen der EMPA konnte durch den Einsatz des Katalysators auch die NO<sub>x</sub>-Emissionen um über 40% reduziert werden. Die PAK-Emissionen konnten durch den Einsatz eines Katalysators sogar um über 80% reduziert werden.

Der kombinierte Einsatz eines Katalysators und Alkylatbenzin kann das Reduktionspotenzial des Katalysators nur geringfügig verbessern. Dies ist auf die ohnehin schon geringen Emissionen eines Katalysators zurückzuführen.

Die Resultate der regulierten Schadstoffe (HC, CO und NO<sub>x</sub>) in Figur 11 konnten auch für unterschiedliche Belastungszyklen an einem Honda GX200-Motor weitgehend bestätigt werden (BNM-Research, 1999). Die Resultate der BNM-Research Studie sind ebenfalls im Annex 4 aufgelistet. Anzumerken ist, dass in sämtlichen Messungen am Honda-Motor HC-Emissionen durch den Einsatz von Alkylatbenzin um über 10% gegenüber dem Betrieb mit herkömmlichem Benzin abnahmen.





**Figur 11** Reduktionspotenzial der Emissionen eines Rasenmähers (Klippro Comet, 1 Zylinder, 190 cm<sup>3</sup>) beim Einsatz eines Katalysators, dem Einsatz von Alkylatbenzin und beim gleichzeitigen Einsatz eines Katalysator und Alkylatbenzin gegenüber dem Betrieb mit herkömmlichem Benzin. Abgeleitet aus Christensen et al. (2001). Die absoluten Emissionswerte der Messungen sind im Annex 4 aufgelistet.

### Reduktionspotenzial bei Geräten mit Katalysator

Die Emissionsmessungen der EMPA an einem Motormäher zeigen, dass der Einsatz eines Katalysators die meisten Emissionen um über 80% reduziert (Figur 10 und 11). Die NO<sub>x</sub>-Emissionen hingegen stiegen jedoch beim Motormäher (Figur 10) um rund 80%, während sie beim Rasenmäher (Figur 11) um über 40% sanken. Da Alkylatbenzin die NO<sub>x</sub>-Emissionen deutlich verringert, ist es angezeigt, Alkylatbenzin auch in Verbrennungsmotoren, die mit einem Katalysator ausgestattet sind, anzuwenden. Gegenüber dem Betrieb mit herkömmlichem Benzin und Katalysator können durch den gleichzeitigen Einsatz von Alkylatbenzin und Katalysator die Emissionen der VOCs n-Hexan, Benzol, Toluol, Ethylbenzol und Xylol um über 80% verringert werden. Die absoluten Emissionen eines Motors mit Katalysator sind jedoch schon mit herkömmlichem Benzin niedrig (Annex 4; Tabelle 15). Entsprechend wer-

den die absoluten Emissionen bei Motoren mit Katalysator durch Alkylatbenzin nur geringfügig verringert.

### 5.1.3. REDUKTIONSPOTENZIAL DER OZONBILDUNG DURCH DEN EINSATZ VON ALKYLATBENZIN

Jedes einzelne VOC in den Abgasen eines Verbrennungsmotors ist durch ein spezifisches Ozon-Reaktivitätspotenzial (so genannte *maximum incremental reactivity* - M.I.R.) charakterisiert. Der M.I.R. Faktor eines VOC-Moleküls beschreibt die Menge Ozon, die pro Einheit VOC unter Einfluss von  $\text{NO}_x$  und Sonnenlicht gebildet werden kann. Während normales Benzin aus einer Vielzahl unterschiedlicher VOCs besteht, beinhaltet Alkylatbenzin (e.g. Aspen 4T, STIHL Motoplus) hauptsächlich Alkane, insbesondere 2,2,4-Trimethylpentane und andere Octane. Der M.I.R.-Faktor dieser Alkane liegt zwischen 1.1 und  $1.4 \text{ gO}_3 \text{ gVOC}^{-1}$ , was deutlich unter den meisten anderen VOCs liegt (z.B. liegt der M.I.R. Faktor von 1,3-Butadien bei  $12.69 \text{ gO}_3 \text{ gVOC}^{-1}$ ). Anhand wissenschaftlich belegter M.I.R. Faktoren (Carter, 1994) und der experimentell bestimmten Zusammensetzung der Abgase von normalem Benzin und Alkylatbenzin (Östermark, 1996) beträgt das maximale Reduktionspotenzial der Ozonbildung von Alkylatbenzin rund 42% gegenüber normalem Benzin. Dieser Wert liegt im Bereich der erwähnten Schätzung des Forstkreis Brig (KMU, 1999). Es muss dabei jedoch beachtet werden, dass die Ozonbildung auch stark von den momentanen Wetterverhältnissen (Sonneneinstrahlung, Wind und Temperatur) abhängt.

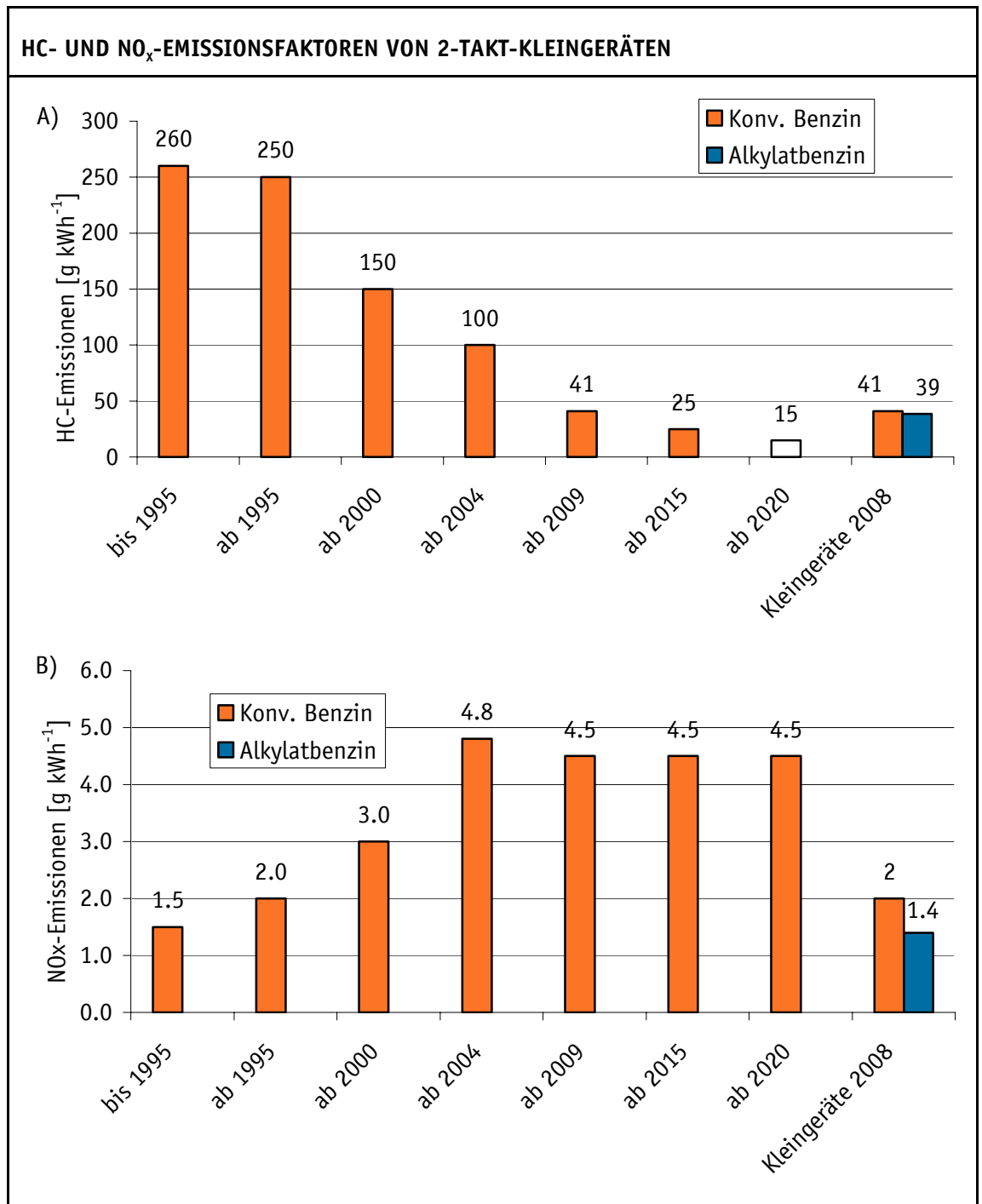
## 5.2. ZEITLICHE ENTWICKLUNG DER EMISSIONSFAKTOREN

Alkylatbenzin wird in der Schweiz schon seit über 10 Jahren zur Minderung der Emissionen eingesetzt. In dieser Zeitspanne hat sich die Technologie der Verbrennungsmotoren deutlich verbessert und die durchschnittlichen Emissionen einzelner Schadstoffe konnten um ein Vielfaches durch technische Massnahmen reduziert werden. Im Folgenden wird anhand der Offroad-Datenbank des BAFU (Infras, 2008) der zeitliche Verlauf der HC- und  $\text{NO}_x$ -Emissionsfaktoren den Emissionsmessungen mit Alkylatbenzin (Kapitel 5.1) gegenübergestellt. Der zeitliche Verlauf der CO-Emissionen wird hier nicht ausdiskutiert, da Alkylatbenzin keine deutliche Reduktion der CO-Emissionen bewirkt und zudem CO kein primärer „Problemluftschadstoff“ ist. Bei den Emissionsfaktoren aus der Offroad-Datenbank ist zu beachten, dass es sich um mittlere Emissionen der in dem entsprechenden Jahr gebauten Geräte handelt. Die Emissionsangaben mit/ohne Alkylatbenzin hingegen sind typische Messwerte der neusten Generation von Kleingeräten (Infras, 2008).

In der Schweiz unterliegen Maschinen und Geräte des Offroad-Sektors nur zum Teil einer Emissionsgesetzgebung (z.B. Baumaschinen im Rahmen der Baurichtlinie Luft, BUWAL 2004, die von Baumaschinen die Einhaltung der EU-Grenzwerte verlangt). Es kann aber davon ausgegangen werden, dass die meisten Maschinen und Geräte, die in der Schweiz in Betrieb gesetzt werden, aufgrund der begrenzten Marktgrösse die EU-Grenzwerte einhalten. Unter dieser Annahme haben sich seit Mitte der 90er Jahre die HC- und NO<sub>x</sub>-Emissionen der Maschinen und Geräte des Offroad-Sektors kontinuierlich verbessert. Demnach haben sich die HC-Emissionen von Kleingeräten mit 2-Takt-Motor zwischen 1995 und 2005 um über 60% verringert, jene von Kleingeräten mit 4-Takt-Motor um 80% (Infras, 2008) (Figur 12 A). Ein Vergleich der HC-Emissionsfaktoren von typischen modernen Kleingeräten (Stihl, 2008) zeigt, dass Kleingeräte, die auf der neusten Technologie beruhen (Baujahr 2008), auch ohne Alkylatbenzin deutlich weniger HC ausstossen als noch vor einigen Jahren.

Im Zuge der Bemühungen die HC-Emissionen zu verringern, erhöhten sich jedoch die NO<sub>x</sub>-Emissionen der 2-Takt-Geräte zwischen 1995 und 2005 (Figur 12 B). Gesamtschweizerisch ist diese Zunahme jedoch vernachlässigbar, da dieses Segment nur einen Anteil von 0.3% an den gesamtschweizerischen NO<sub>x</sub>-Emissionen hat (Figur 3)<sup>10</sup>. Emissionsmessungen mit neuen Kleingeräten zeigen, dass auch bei den NO<sub>x</sub>-Emissionen in den letzten Jahren durch technische Massnahmen Fortschritte erreicht wurden. Dies deutet darauf hin, dass die Annahmen in der Offroad-Datenbank eher konservativ sind. Angesichts der geringen absoluten Bedeutung dieses Segments für die NO<sub>x</sub>-Emissionen ist dies allerdings ohne grossen Belang.

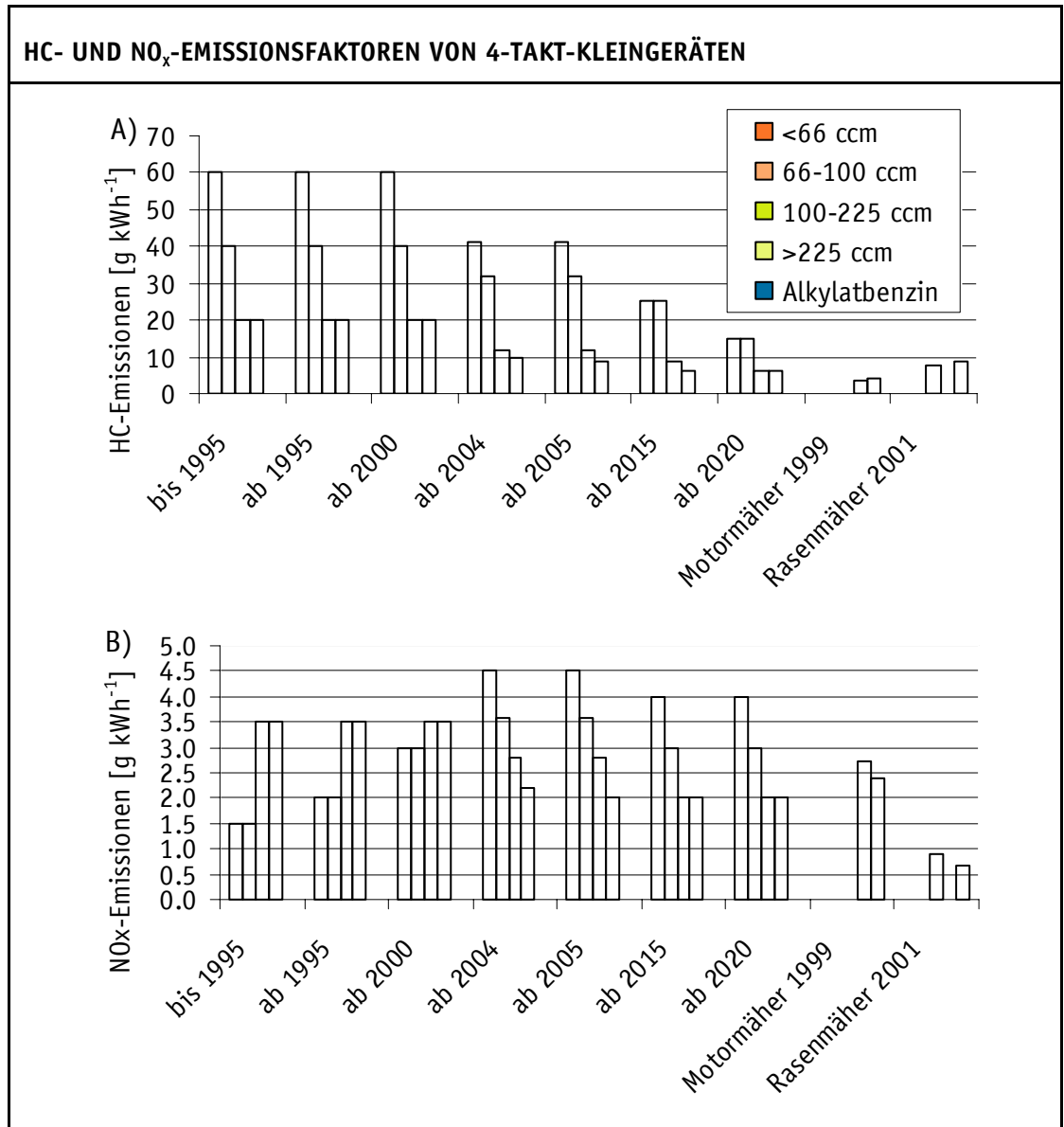
<sup>10</sup> Genaugenommen ist der Anteil noch geringer, da in Figur 3 der ganze Nutzverkehr (Lastwagen, Busse) nicht berücksichtigt ist.



**Figur 12** Zeitliche Entwicklung der HC- (A) und NO<sub>x</sub>-Emissionsfaktoren (B) von 2-Takt-Motoren im Offroad-Sektor zwischen 1995 und 2020 im Vergleich zu Mittelwerten von Kleingeräten aus dem Jahr 2008 (Infras, 2008). Für die Kleingeräte sind zudem Emissionen bei Betrieb mit Alkylatbenzin dargestellt.

Ähnlich verlief die zeitliche Entwicklung der durchschnittlichen HC- und  $\text{NO}_x$ -Emissionen der 4-Takt-Motoren des Offroad-Sektors. Die einzelnen Grössenklassen der 4-Takt-Motoren weisen jedoch stark unterschiedliche Emissionsfaktoren auf. Deshalb müssen die Grössenklassen der Motoren im zeitlichen Verlauf berücksichtigt werden (Figur 13). Die kleinen Motoren ( $<66 \text{ cm}^3$ ) weisen eine markante Reduktion der HC-Emissionen von  $60 \text{ g kWh}^{-1}$  auf rund  $40 \text{ g kWh}^{-1}$  zwischen 1995 und 2005 auf (Figur 13 A). Die grösseren Motoren ( $>100 \text{ cm}^3$ ) wiesen schon vor 1995 HC-Emissionen von etwa  $20 \text{ g kWh}^{-1}$  auf. Zwei Vergleichsmessungen mit Motormäher der Grössenklasse  $190 \text{ cm}^3$  und  $479 \text{ cm}^3$  aus dem Jahr 1999, die mit Alkylatbenzin betrieben wurden (Mayer et al., 1999; Christensen et al., 2001), weisen über 50% tiefere HC-Emissionen auf als typische Emissionen im Jahr 2000 der gleichen Motorenklasse.

Analog zu den 2-Takt-Motoren wird in der Offroad-Datenbank angenommen, dass die  $\text{NO}_x$ -Emissionen auch bei den kleinen 4-Takt-Motoren ( $<100 \text{ cm}^3$ ) seit 1995 von  $1.5 \text{ g kWh}^{-1}$  auf  $4.5 \text{ g kWh}^{-1}$  zugenommen haben (Figur 13 B). Die grossen 4-Takt-Motoren ( $>100 \text{ cm}^3$ ) veränderten sich kaum und für die kommenden Jahre wird eine Abnahme der  $\text{NO}_x$ -Emissionen erwartet. Die Vergleichsmessungen des kleineren Rasenmähers wie auch jene des Motormähers zeigen leicht tiefere  $\text{NO}_x$ -Emissionen, wenn man sie mit den Emissionsfaktoren mit Baujahren „ab 1995“ vergleicht.



**Figur 13** Zeitliche Entwicklung der HC- (A) und NO<sub>x</sub>-Emissionen (B) (geordnet nach Grössenklassen) von 4-Takt-Motoren im Offroad-Sektor zwischen 1995 und 2020 (Infras, 2008) im Vergleich zu Einzelmessungen des Motormähers (479 cm<sup>3</sup>; im Jahr 1999) und des Rasenmähers (190 cm<sup>3</sup>; im Jahr 2001). Die Emissionen der Einzelmessungen wurden zudem mit Alkylatbenzin (blauer Balken) durchgeführt.

### 5.3. FAZIT DER EMISSIONSMINDERUNG DURCH ALKYLATBENZIN

Anhand der vorgestellten Emissionsmessungen kann die Emissionsminderung durch Alkylatbenzin wie folgt zusammengefasst werden:

### HC-Emissionen:

- › Die totalen HC-Emissionen können durch Alkylatbenzin kaum gesenkt werden. Einige Messungen lassen gar einen kleinen Anstieg erwarten. Wohl aber sinkt der Anteil des besonders schädlichen Benzols. Dadurch, dass Alkylatbenzin hauptsächlich aus Alkanen besteht, können die Aromaten-Emissionen gegenüber dem Betrieb mit konventionellem Benzin unabhängig des Motortyps über 90% gesenkt werden. Dies gilt insbesondere für die karzinogenen VOC-Komponenten Benzol, Toluol und Xylol. Die Benzol-Emissionen werden durch den Einsatz von Alkylatbenzin sogar um rund 96% reduziert.
- › Diese Aussagen zur Absenkung der Benzol- bzw. Aromaten-Emissionen können plausibel durch die chemische Zusammensetzung (Kapitel 3.3) von Alkylatbenzin erklärt werden. Allerdings hat im vergangenen Jahrzehnt auch der Benzolgehalt im konventionellen Treibstoff abgenommen. Seit Januar 2000 darf herkömmliches Benzin nur noch 1 Vol.-% Benzol enthalten. Vor diesem Datum lag der gesetzliche Grenzwert bei 5 Vol.-%. Entsprechend enthielt herkömmliches Benzin vor 2000 typischerweise etwa 3.7 Vol.-% Benzol.
- › Weniger eindeutig sind die Aussagen zur Emissionsminderung von Formaldehyd, Acetaldehyd und 1,3-Butadien. Während einzelne Messungen (EMPA, 2001; Magnusson, 2002) einen geringen Anstieg von Aldehyden ausweisen, weisen andere (TÜV Bayern, 1989) eine Reduktion aus. In jedem Fall dürfte die Veränderung vergleichsweise gering ausfallen.
- › Im Vergleich zum Katalysator kann Alkylatbenzin als ebenbürtige Massnahme eingestuft werden, um Benzol- und andere Aromaten zu reduzieren. Ein Katalysator verringert jedoch zudem die ebenfalls schädlichen Formaldehyd-, Acetaldehyd- und 1,3-Butadien-Emissionen. Folglich können mit einem Katalysator, im Unterschied zu Alkylatbenzin, auch die totalen HC-Emissionen verringert werden.
- › Im langzeitlichen Verlauf sind die HC-Emissionen durch technische Fortschritte seit 1995 sowohl bei den 2-Takt als auch bei den 4-Takt-Motoren markant gesunken. Alkylatbenzin ist daher am wirksamsten, wenn es in alten Verbrennungsmotoren mit Baujahr vor 2000 zum Einsatz kommt.

### NO<sub>x</sub>-Emissionen

- › NO<sub>x</sub>-Emissionen der potenziellen Einsatzfelder von Alkylatbenzin (Offroad-Sektor und Motorräder) sind im Vergleich zu den NO<sub>x</sub>-Emissionen aller Personenwagen und Dieselmotoren gering.
- › In allen Motortypen konnten durch den Einsatz von Alkylatbenzin die NO<sub>x</sub>-Emissionen deutlich (zwischen 10 und 50%) gesenkt werden.

- › Der Einsatz eines Katalysators zur Reduktion von HC-Emissionen kann – wie eine Messung zeigte – allerdings zu einer Erhöhung der NO<sub>x</sub>-Emissionen führen. Durch den Einsatz von Alkylatbenzin in Geräten mit Katalysator lässt sich diese Zunahme teilweise kompensieren.
- › In den letzten 10 Jahren sind die NO<sub>x</sub>-Emissionen durch Massnahmen zur Reduzierung der HC-Emissionen<sup>11</sup> seit 1995 bei neuen Motoren angestiegen. Diesbezüglich könnte Alkylatbenzin durchaus eine geeignete Begleitmassnahme bilden – angesichts der geringen Bedeutung der NO<sub>x</sub>-Emissionen der Kleingeräte allerdings mit beschränkter Wirkung.

### **CO-Emissionen**

- › Die CO-Emissionen nahmen durch den Einsatz von Alkylatbenzin in allen untersuchten Motoren um maximal 10% ab. Bei einer angenommenen Messgenauigkeit von rund 20% (EMPA, 2004) ist diese Abnahme allenfalls mit Vorsicht zu interpretieren.
- › Im Vergleich zum Alkylatbenzin können mit einem Katalysator die CO-Emissionen deutlich effektiver reduziert werden.

### **CO<sub>2</sub>-Emissionen**

- › Messungen mit neuen 2-Takt-Kleingeräten zeigen, dass durch Alkylatbenzin der CO<sub>2</sub>-Ausstoss um etwa 6% verringert werden kann (Stihl, 2008). Allerdings sind allfällige zusätzlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen während der Produktion von Alkylatbenzin unbekannt, weshalb unklar ist, ob mit Alkylatbenzin entscheidende CO<sub>2</sub>-Vorteile erreicht werden können.

## **5.4. FAZIT BEZÜGLICH DER GESUNDHEITLICHEN VORTEILE VON ALKYLATBENZIN**

In Anbetracht der vorgestellten Reduktionspotenziale durch den Einsatz von Alkylatbenzin stellt sich die Frage, wie hoch der relative gesundheitliche Nutzen von Alkylatbenzin für den Anwender von Kleingeräten im Vergleich zum Betrieb mit herkömmlichem Benzin ist. Eine quantitative Aussage hierzu ist schwierig, da jeder Abgasstoff unterschiedlich wirkt und die Abschätzung des Gesundheitsrisikos auf Unit-Risks beruht (siehe Kapitel 3.4). Wir verwenden im Folgenden die Unit-Risk aus der Tabelle 3, um den aggregierten Gesundheitsvorteil von Alkylatbenzin abzuschätzen. Im Annex 1 (Tabelle 10) sind Unit-Risks, Emissio-

<sup>11</sup> Zur effizienten Verbrennung von HC-Molekülen bedarf es einer hohen Betriebstemperatur; hohe Temperaturen favorisieren wiederum die Entstehung von NO<sub>x</sub>. Daher sind Massnahmen zur Reduktion von HC häufig mit einer Zunahme der NO<sub>x</sub> verbunden.



nen einer (alten) 2-Takt-Motorsäge<sup>12</sup> und die aggregierten Gesundheitsrisikos für den Betrieb mit Alkylatbenzin und mit herkömmlichem Benzin zusammengefasst.

Aggregiert man das Gesundheitsrisiko zu einer Zahl so wird ersichtlich, dass das Gesundheitsrisiko bei Betrieb mit Alkylatbenzin etwa 10-mal kleiner ist als bei Betrieb mit herkömmlichem Benzin. Allerdings muss bei diesem Risiko-Assessment berücksichtigt werden, dass es sich um eine statistische Wahrscheinlichkeit handelt, die höchstens für den relativen Vergleich und als Indikation herbeigezogen werden darf. Das gemäss Annex 1 (Tabelle 10) ermittelte „Gesundheitsrisiko“ wird weitgehend durch Benzol bestimmt. Während Benzol nachweislich Leukämie verursachen kann, sind die Wirkungsmechanismen von Formaldehyd weitgehend unbekannt. Entsprechend ist die Bewertung von Formaldehyd kontrovers. Auch wenn in Tierversuchen die Bildung von Tumoren gezeigt werden konnte, stufen viele Organisationen (SUVA, IARC-WHO etc.) das kanzerogene Risiko von Formaldehyd im Vergleich zu Benzol deutlich geringer ein. Das Bild würde sich nicht grundlegend ändern, selbst wenn man Formaldehyd stärker gewichten würde und wenn man unterstellt, dass Formaldehyd durch Verwendung von Alkylatbenzin sogar leicht zunähme<sup>13</sup>.

Das effektive Gesundheitsrisiko durch Abgase eines Offroad-Motors hängt zudem stark von den lokalen Wetterbedingungen ab. So reduziert schon eine leichte Brise die Luftbelastung auf ein Minimum. So besehen muss man die oben angestellte Betrachtung zum Gesundheitsrisiko vorsichtig interpretieren, denn die effektiv vorkommenden Konzentrationen sind weit tiefer als was bei den Tierversuchen jeweils eingesetzt wird. So haben verschiedene Studien gezeigt, dass die messbaren Konzentrationen von Benzol bzw. Formaldehyd beim Einsatz z.B. von Motorsägen weit unter den empfohlenen Grenzwerten<sup>14</sup> liegen (Weiger and Barth, 1992; Baldauf et al., 2006). Weiger und Barth konnten zudem zeigen, dass der Einsatz von Alkylatbenzin zu einer spürbaren Abnahme der Konzentration von Benzol führt; auch die Konzentration von Formaldehyden hat bei der Verwendung von Alkylatbenzin abgenommen, allerdings in geringem Ausmass (von 0.0375 auf 0.0345 mg/m<sup>3</sup>).

12 Mangels neuerer Messwerte für diese Schadstoffe mussten hier Messwerte einer alten Motorsäge verwendet werden (vgl. Annex 3). Weil es hier um indikative Relativ-Vergleiche geht, kann man unterstellen, dass sich die Aussagen auf neuere Geräte übertragen lassen.

13 Nämlich Risk-Faktor 1.30E-05 statt 2.8E-09 und unterstellte Zunahme von Formaldehyd um 25%.

14 In der Schweiz gibt es keine gesetzliche Regelung bezüglich der Formaldehyd Immissionsgrenzwerte. Die in den USA geltenden Sicherheitslimiten (PEL) wurden jedoch bei allen Versuchen eingehalten.

## 6. HOCHRECHNUNGEN DER BENZOL- UND NO<sub>x</sub>-EMISSIONEN

Im Folgenden werden die Reduktionspotenziale von Alkylatbenzin bezüglich der Benzol- und NO<sub>x</sub>-Emissionen analysiert und mit anderen Luftreinhaltemassnahmen verglichen. Dazu werden Hochrechnungen der gesamtschweizerischen Emissionen von Personenwagen und Offroad-Motoren vorgestellt und das Reduzierungspotenzial durch den Einsatz von Alkylatbenzin quantifiziert. Anschliessend werden die spezifischen Emissionsfaktoren der untersuchten Geräte einem entsprechenden Personenwagen gegenüber gestellt. Während Geräte älteren Baujahrs (vor 2000) mit den Emissionen eines EURO-2-Personenwagens verglichen werden, werden für neue Geräte (Baujahr 2008) die Emissionen eines EURO-4-Personenwagens als Referenzwert herbeigezogen. Neben der stündlichen Emission werden auch Hochrechnungen der Jahresemissionen von einzelnen Offroad-Motoren und Personenwagen verglichen.

Bei all diesen Hoch- und Vergleichsrechnungen muss beachtet werden, dass die quantitative Datenbasis zur Wirkung von Alkylatbenzin begrenzt ist. Das gilt namentlich für die Wirkung bei den Benzol-Emissionen. Die gemachten Aussagen basieren letztlich auf Abschätzungen, die sich an einzelnen Messungen orientieren. Aussagen zu den NO<sub>x</sub>-Emissionen werden der Vollständigkeit halber mit aufgeführt, obwohl die Stickoxide im Kontext Alkylatbenzin angesichts des bescheidenen Anteils der Kleingeräte an den Gesamtstickoxidemissionen von sekundärer Bedeutung sind. Die folgenden Zahlen sind deshalb als Hinweise auf die Grössenordnung der Effekte zu verstehen.

### 6.1. SPEZIFISCHE EMISSIONEN VON GERÄTEN

Für den Anwender, der den Abgasen eines Geräts ausgesetzt ist, sind insbesondere die momentanen Emissionen von Interesse. Um die Emissionen einzelner Geräte zu veranschaulichen werden im folgenden Kapitel die stündlichen Benzol- und NO<sub>x</sub>-Emissionen der untersuchten Offroad-Geräte den Emissionen von Personenwagen gegenübergestellt.

#### 6.1.1. STÜNDLICHE BENZOL-EMISSIONEN

Im Vergleich zu den HC-Emissionen existieren nur wenige Daten zu spezifischen Benzol-Emissionen von Verbrennungsmotoren. Häufig werden deshalb die Benzol-Emissionen aus den Verhältnissen von Benzol zu HC und den HC-Emissionen abgeleitet. Für die Schätzung

der Benzol-Emissionen von Kleingeräten<sup>15</sup> greifen wir ebenfalls auf Benzol/HC-Verhältnisse zurück. In Tabelle 4 sind die Benzol- und HC-Messdaten von Motorrädern (EMPA, 2004) und die eines Motormähers (siehe Kapitel 5.1.2) aufgelistet. Bei allen Messungen wurde Benzin mit einem Benzol-Gehalt von 3.7 Vol.-% verwendet.

<b>GRUNDLAGE ZUR BERECHNUNG VON BENZOL-EMISSIONEN</b>						
	<b>Roller 2-Takt, 50cm<sup>3</sup>, 97/24/EG</b>	<b>Roller 2-Takt, 124cm<sup>3</sup> FAV3</b>	<b>Roller 4-Takt, 124cm<sup>3</sup>, 97/24/EG)</b>	<b>Roller 4-Takt, 250cm<sup>3</sup>, 97/24/EG</b>	<b>Motorrad 4-Takt, 583cm<sup>3</sup>, FAV3</b>	<b>Motormä- her 4- Takt, 479 cm<sup>3</sup></b>
Benzol	225 mg km <sup>-1</sup>	825 mg km <sup>-1</sup>	117 mg km <sup>-1</sup>	83 mg km <sup>-1</sup>	77 mg km <sup>-1</sup>	186 mg h <sup>-1</sup>
HC mg km <sup>-1</sup>	5678 mg km <sup>-1</sup>	11700 mg km <sup>-1</sup>	2666 mg km <sup>-1</sup>	1456 mg km <sup>-1</sup>	1651 mg km <sup>-1</sup>	32700 mg h <sup>-1</sup>
Benzol/HC	0.0397	0.0705	0.0439	0.0567	0.0468	0.0057
Mittelwerte Benzol/HC	2-Takt-Roller: 0.055		4-Takt: Roller/Motorrad: 0.049			Offroad: 0.0057

**Tabelle 4** Verhältnis von Benzol zu HC in den Abgasen von 2-Takt und 4-Takt-Motoren. Daten für Zweiräder aus EMPA (2004) im Zyklus CADC (Urban) und für den Motormäher aus EMPA (2001). Alle Messungen fanden mit Benzin mit 3.7 Vol.-% Benzol statt.

Die Messungen zeigen, dass das Benzol/HC-Verhältnis von Verbrennungsmotoren zwischen 0.6% und 7% schwanken kann. Dies ist mit den unterschiedlichen Belastungszyklen während der Emissionsmessung zu begründen. Aus anderen Messungen ist bekannt, dass – falls ein Motor unter konstanter Teillast gemessen wird – der Benzol-Anteil in den Abgasen deutlich kleiner ist als unter einem dynamischen Belastungszyklus. Dies kommt auch in den Benzol/HC-Verhältnissen in Tabelle 4 zum Ausdruck: Die Motorräder wurden unter dynamischen Belastungszyklen gemessen, der Motormäher unter konstanter Teillast. Da der dynamische Belastungszyklus eher dem realen Belastungszyklus eines Kleinmotors (z.B. Motorsäge) entspricht, verwenden wir im Folgenden den Mittelwert der Benzol/HC-Verhältnisse aller Motorräder (rund 5%), um den Benzol-Ausstoss älterer Kleingeräte (Baujahr vor 2000) abzuschätzen.

Seit Januar 2000 ist der Benzol-Anteil im herkömmlichen Treibstoff auf 1 Vol.-% limitiert. Interne Messungen der EPA (USA) zeigen, dass bei neueren Geräten (mit und ohne Katalysator) der Benzolanteil im Abgas in etwa dem Benzolanteil im Benzin entspricht. Deshalb setzten wir in den folgenden Hochrechnungen den Benzolanteil in den HC-

<sup>15</sup> Ausser für den Motormäher und für eine Motorsäge älteren Baujahrs sind für alle Kleingeräte nur HC-Emissionen bekannt (siehe Kapitel 5).

Emissionen für neue Kleingeräte (Baujahr 2008) auf 1%. Die so bestimmten Benzol-Emissionen sind demnach Abschätzungen und müssen mit diesem Vorbehalt interpretiert werden.

In der Tabelle 5 sind die Benzol-Emissionen zusammengestellt, die zum Teil auf Messungen (Personenwagen und Motormäher) beruhen und zum Teil nach dem Benzol/HC-Verhältnis berechnet wurden (Rasenmäher und Motorsäge). Überdies ist die Entwicklung des Benzolgehalts berücksichtigt. Um stündliche Emissionen zu berechnen wurde eine mittlere Fahrgeschwindigkeit von  $39 \text{ km h}^{-1}$  für Personenwagen angenommen (BFS, 2007). Der Verhältnisfaktor F (Tabelle 5) beschreibt den Benzol-Ausstoss jedes Geräts im Vergleich zu einem entsprechenden Personenwagen. Für ältere Kleingeräte wurde ein Personenwagen der Abgasstufe EURO 2 herbeigezogen. Neue Kleingeräte wurden mit einem Personenwagen der Abgasstufe EURO 4 verglichen. Emissionen der Personenwagen entsprechen jeweils dem Betrieb mit konventionellem Treibstoff. Dabei gewichten wir Benzin- bzw. Diesel-Personenwagen entsprechend ihrer Marktanteile bei den Neuzulassungen (70% Benzin, 30% Diesel), um die Emissionen eines „mittleren“ Neuwagens zu bestimmen.

Für die Berechnung der Emissionen bei Betrieb mit Alkylatbenzin wurde angenommen, dass sich der Benzol-Ausstoss im Vergleich zum Betrieb mit herkömmlichem Benzin um 96% verringert (vgl. Kapitel 5).

STÜNDLICHE BENZOL-EMISSIONEN							
Gerät/Fahrzeug	HC-Emission	Benzol-Emission	Geschw. [km h <sup>-1</sup> ]	Mit konv. Treibstoff [g h <sup>-1</sup> ]	Mit Alkylatbenzin [g h <sup>-1</sup> ]	F (konv. Treibstoff)	F (Alkylatbenzin)
<b>Personenwagen EURO 2 (1996-2000)</b>		<b>15 mg km<sup>-1</sup></b>	<b>39</b>	<b>0.59</b>		<b>1</b>	
4-Takt-Motormäher Baujahr vor 1999 (479 cm <sup>3</sup> , 8-10 kW)		186mg h <sup>-1</sup>		~0.19	~0.01	0.3	~0.01
4-Takt-Rasenmäher Baujahr vor 2000 (190cm <sup>3</sup> , 2.9 kW)	22 g h <sup>-1</sup>	1100 mg h <sup>-1</sup>		~1.1	~0.04	~1.9	~0.08
2-Takt-Motorsäge Baujahr vor 2000 (45 cm <sup>3</sup> , 2.3 kW)	284 g h <sup>-1</sup>	14200 mg h <sup>-1</sup>		~14	~0.57	~24.3	~1.0
<b>Personenwagen EURO 4 (ab 2006)</b>		<b>2.3mg km<sup>-1</sup></b>	<b>39</b>	<b>0.09</b>		<b>1</b>	
Typ. Kleingerät (2-Takt) Baujahr 2008; 2.5 kW	41 g kWh <sup>-1</sup>	1025 mg h <sup>-1</sup>		1	0.04	11.4	0.46

**Tabelle 5** Vergleich der stündlichen Benzol-Emissionen von Personenwagen (BUWAL, 2004) und Offroad-Geräten. Der Verhältnisfaktor F beschreibt den Benzol-Ausstoss jedes Gerätes im Vergleich zum EURO-4- bzw. EURO-2-Personenwagen betrieben mit herkömmlichem Treibstoff (5 Vol.-% Benzol beim EURO 2 und 1 Vol.-% beim EURO 4). Benzol-Emissionen der Offroad-Geräte (*kursiv*) wurden anhand des Benzol/HC-Verhältnis abgeschätzt. Die Emissionsfaktoren der PW sind gewichtete Werte (30% Diesel- und 70% Benzinfahrzeuge).

Unter Berücksichtigung der Unsicherheiten, die diesen Abschätzungen zugrunde liegen, können anhand der Angaben in Tabelle 5 folgende Aussagen gemacht werden:

- › Bei den Personenwagen lässt sich eine markante Absenkung der Benzol-Emissionen zwischen der Abgas-Norm EURO 2 und EURO 4 feststellen. Es kommt daher entscheidend darauf an, mit welchem PW die Vergleiche angestellt werden. Die Stufe EURO 4 ist eine vergleichsweise strenge Messlatte.
- › Bei den älteren Offroad-Geräten ist die Streuung der Benzol-Emissionen sehr gross. Entsprechend emittieren die aufgelisteten 4-Takt-Benzinmotoren pro Betriebsstunde zwischen einem Drittel und 24-mal soviel Benzol wie ein EURO-2-Personenwagen. Werden die 4-Takter mit Alkylatbenzin betrieben, so stossen sie nur noch einen Bruchteil der Emissionen des Personenwagens aus. Sogar bei der 2-Takt Motorsäge, welche mit herkömmlichem Benzin 14-mal mehr Benzol als ein EURO-2-Personenwagen ausstösst, können die Benzol-

Emissionen durch den Einsatz von Alkylatbenzin auf das Niveau eines EURO-2-Personenwagens reduziert werden.

- › Moderne 2-Takt-Kleingeräte stossen im Durchschnitt etwa 11-mal mehr Benzol aus als ein EURO-4-Personenwagen. Mit Alkylatbenzin kann jedoch der Benzolausstoss moderner 2-Takt-Geräte auf etwa die Hälfte der Emissionen des EURO-4-Personenwagens gesenkt werden.

Namentlich die quantitativen Reduktionen von 2-Takt-Motoren müssen mit Vorsicht interpretiert werden, da es sich um abgeleitete Schätzungen ohne gute empirische Basis handelt.

### 6.1.2. STÜNDLICHE NO<sub>x</sub>-EMISSIONEN

Ausgehend von den gesamtschweizerischen NO<sub>x</sub>-Emissionen von Personenwagen (BUWAL, 2004) können die stündlichen Emissionen unter der Annahme einer Durchschnittsgeschwindigkeit berechnet werden. In Tabelle 6 sind die stündlichen NO<sub>x</sub>-Emissionen der Offroad-Geräte aus Kapitel 5 den Emissionen von Personenwagen gegenübergestellt. Für die Berechnung der NO<sub>x</sub>-Emissionen bei Betrieb mit Alkylatbenzin wurde angenommen, dass sich der NO<sub>x</sub>-Ausstoss im Vergleich zum Betrieb mit herkömmlichem Benzin um 25% verringert.

STÜNDLICHE NO <sub>x</sub> -EMISSIONEN						
Gerät/Fahrzeug	NO <sub>x</sub> -Emission	Geschw. [km h <sup>-1</sup> ]	Mit konv. Treibstoff [g h <sup>-1</sup> ]	Mit Alkylatbenzin [g h <sup>-1</sup> ]	F (konv. Benzin)	F (Alkylatbenzin)
<b>Personenwagen EURO 2</b>	<b>0.38 g km<sup>-1</sup></b>	<b>39</b>	<b>15</b>		<b>1</b>	
4-Takt-Motormäher Baujahr vor 1999 (479 cm <sup>3</sup> , 8-10 kW)	24.4 g h <sup>-1</sup>		24.4	18.3	1.6	1.2
4-Takt-Rasenmäher Baujahr vor 2000 (190cm <sup>3</sup> , 2.9 kW)	2.6 g h <sup>-1</sup>		2.6	1.95	0.17	0.13
2-Takt-Motorsäge Baujahr vor 2000 (45 cm <sup>3</sup> , 2.3 kW)	27 g h <sup>-1</sup>		27.0	20.3	1.8	1.4
<b>Personenwagen EURO 4</b>	<b>0.18 g km<sup>-1</sup></b>	<b>39</b>	<b>7.2</b>		<b>1</b>	
Typ. Kleingerät (2-Takt) Baujahr 2008; 2.5 kW	2 g kWh <sup>-1</sup>		5	3.75	0.69	0.52

**Tabelle 6** Vergleich der stündlichen NO<sub>x</sub>-Emissionen von Personenwagen (BUWAL, 2004) und typischer Offroad-Geräte. Der Vergleichsfaktor F beschreibt den NO<sub>x</sub>-Ausstoss jeden Gerätes im Vergleich zum EURO-4-Personenwagen betrieben mit herkömmlichem Benzin. Die Emissionsfaktoren der PW sind gewichtete Werte (30% Diesel- und 70% Benzinfahrzeuge).

Die Vergleiche zeigen, dass die  $\text{NO}_x$ -Emissionen stark streuen. Deshalb lassen sich die Einzelmesswerte nur schwer miteinander vergleichen. Jedenfalls kann man davon ausgehen, dass sich die  $\text{NO}_x$ -Emissionen durch den Einsatz von Alkylatbenzin um rund 25% reduzieren lassen. Allerdings hat diese Reduktion keine massgebende Wirkung auf die gesamtschweizerischen  $\text{NO}_x$ -Emissionen.

## 6.2. VERGLEICH DER JAHRESEMISSIONEN EINZELNER GERÄTE

Die Jahresemissionen eines Geräts sind insofern wichtig, da sie die jährliche Expositionsdauer des Anwenders mit berücksichtigen. Deshalb werden im folgenden Kapitel die jährlichen Emissionen der untersuchten Offroad-Geräte den Emissionen eines Personenwagens gegenübergestellt. Da vor allem Benzol interessiert, beschränkt sich diese Illustration auf diesen Schadstoff.

### **Jährliche Benzol-Emissionen**

Die jährlichen Benzol-Emissionen von Fahrzeugen und Offroad-Geräten ergeben sich aus den Kilometer- bzw. Stunden-Emissionen (Tabelle 5) multipliziert mit der spezifischen Jahresleistung in Kilometer bzw. Stunden pro Gerät. In Tabelle 7 sind die Jahresleistungen nach BUWAL (2004) und Infrac (2008) und die daraus resultierenden jährlichen Benzol-Emissionen zusammengefasst und den entsprechenden Personenwagen gegenübergestellt.

JÄHRLICHE BENZOL-EMISSIONEN					
Gerät / Fahrzeug	Leistung	Mit konv. Treibstoff [g a <sup>-1</sup> ]	Mit Alkylatbenzin [g a <sup>-1</sup> ]	F (konv. Benzin)	F (Alkylatbenzin)
<b>Personenwagen EURO 2</b>	<b>14'000 km a<sup>-1</sup></b>	<b>210</b>		<b>1</b>	
4-Takt-Motormäher Baujahr vor 1999 (479 cm <sup>3</sup> , 8-10 kW)	120 h a <sup>-1</sup>	22.3	~0.9	~0.11	<0.01
4-Takt-Rasenmäher Baujahr vor 2000 (190cm <sup>3</sup> , 2.9 kW)	12.5 h a <sup>-1</sup>	~14	~0.6	~0.07	<0.01
2-Takt-Motorsäge Baujahr vor 2000 (45 cm <sup>3</sup> , 2.3 kW)	6.2 h a <sup>-1</sup>	~88	~3.5	~0.42	~0.02
<b>Personenwagen EURO 4</b>	<b>14'000 km a<sup>-1</sup></b>	<b>32</b>		<b>1.0</b>	
Typ. Kleingerät (2-Takt) Baujahr 2008; 2.5 kW	6.2 h a <sup>-1</sup>	6.4	~0.25	~0.2	<0.01

**Tabelle 7** Vergleich der jährlichen Benzol-Emissionen von Personenwagen (BUWAL, 2004), Motorräder (EMPA, 2004) und der untersuchten Offroad-Geräte aus Kapitel 5. Die Jahresleistung für den Motormäher entspricht der professionellen Nutzung, die des Rasenmähers und der Motorsäge der privaten Nutzung (Infras, 2008). Der Verhältnisfaktor F beschreibt den Benzol-Ausstoss jedes Gerätes im Vergleich zum EURO-4-Personenwagen betrieben mit herkömmlichem Treibstoff. Benzol-Emissionen des Rasenmähers und der Motorsäge (*kursiv*) wurden anhand des Benzol/HC-Verhältnis abgeschätzt. Die Emissionsfaktoren der PW sind gewichtete Werte (30% Diesel- und 70% Benzinfahrzeuge).

Unter Berücksichtigung der bereits erwähnten Unsicherheiten bei der Berechnung der Benzol-Emissionen können anhand der Tabelle 7 folgende Aussagen gemacht werden:

- › Mit 120 Betriebsstunden pro Jahr beträgt der jährliche Benzolausstoss eines professionell genutzten Motormähers gut 10% der Emissionen eines EURO-2-Personenwagens. Wird der Mäher mit Alkylatbenzin betrieben, so kann der jährliche Benzolausstoss auf weniger als 1% des Ausstosses eines EURO-2-Personenwagens gesenkt werden.
- › Ein Rasenmäher emittiert gemäss der getroffenen Annahmen (siehe Abschnitt 6.1.1) bei einer Betriebszeit von 12.5 h pro Jahr etwa 7% der Benzol-Emissionen eines EURO-2-Personenwagens. Wird er mit Alkylatbenzin betrieben, so reduzieren sich die jährlichen Benzol-Emissionen auf etwa 1% des EURO-2-Personenwagens.
- › Eine privat genutzte Motorsäge, die durchschnittlich 6 h pro Jahr im Einsatz ist, stösst gemäss der getroffenen Annahmen etwa 40% der Benzol-Emissionen eines EURO-2-Personenwagens aus. Wird sie jedoch mit Alkylatbenzin betrieben, so emittiert sie etwa 2% der Benzol-Emissionen eines EURO-2-Personenwagens.



› Typische moderne Kleingeräte stossen bei einer jährlichen Betriebszeit von rund 10 h pro Jahr etwa ein Drittel der Benzol-Emissionen eines EURO-4-Personenwagens aus. Mit Alkylatbenzin kann der Benzol-Ausstoss von modernen Kleingeräten auf weniger als 1% der Emissionen eines EURO-4-Personenwagens gesenkt werden.

Der jährliche Benzolausstoss kann durch den Einsatz von Alkylatbenzin demnach bei allen untersuchten Offroad-Geräten unter den Benzol-Ausstoss eines entsprechenden Personenwagens gesenkt werden. Auch hier gilt aber Vorsicht bei der Interpretation, da es sich um abgeleitete Schätzungen handelt.

### 6.3. MINDERUNGSPOTENZIAL DER GESAMTSCHWEIZERISCHEN BENZOL-EMISSIONEN VON VERBRENNUNGSMOTOREN

Im folgenden Kapitel werden die gesamtschweizerischen Benzol-Emissionen von relevanten Fahrzeuggruppen und Offroad-Motoren aufgezeigt. Anhand von Szenarienrechnungen wird die Reduzierung der Emissionen durch den Einsatz von Alkylatbenzin quantifiziert und den gesamtschweizerischen Emissionen gegenübergestellt. Wir beschränken uns dabei auf die Betrachtung von Benzol, weil bei den Stickoxiden der Anteil der benzinbetriebenen Offroad-Geräte praktisch vernachlässigbar ist.

Die gesamtschweizerischen Benzol-Emissionen stammen hauptsächlich von benzinbetriebenen Motoren. Der Anteil der Dieselmotoren ist marginal, weshalb nur Benzin-Fahrzeuge und -Geräte in diese Betrachtung einbezogen werden. Derzeit (Stand 2005) emittieren Personenwagen, Motorrädern und Offroad-Motoren knapp 1'000 Tonnen Benzol pro Jahr (BUWAL, 2004; Infrac, 2008). Rund 95% dieser Emissionen werden von Personenwagen und Motorrädern verursacht, während der Offroad-Sektor für die restlichen knapp 50 t a<sup>-1</sup> verantwortlich ist. In Figur 14 sind fünf Szenarien hinsichtlich der künftigen Entwicklung der Benzol-Emissionen dargestellt. Dabei wurde die Reduktion des Benzol-Gehalts im Treibstoff ab dem Jahr 2000 in allen Szenarien berücksichtigt.

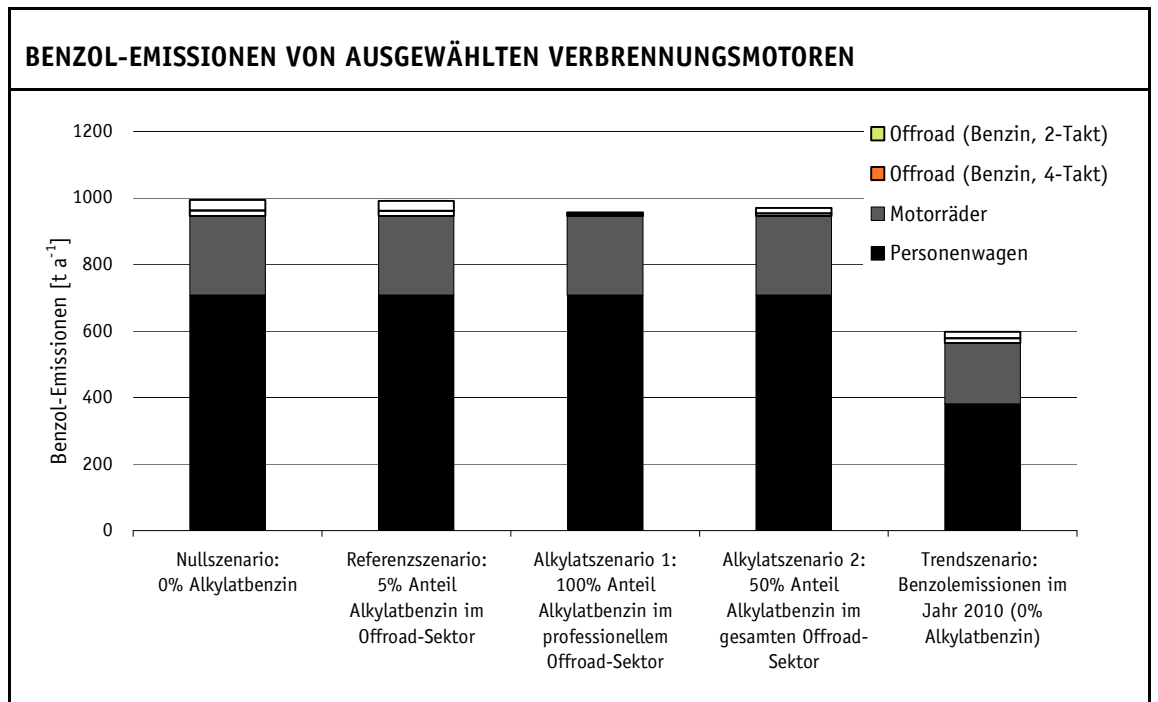
- › Nullszenario: Die Benzolemissionen des Offroad-Sektors und des Strassenverkehrs hätten im Jahr 2005 knapp 1'000 t betragen, wenn kein Alkylatbenzin zum Einsatz gekommen wäre.
- › Referenzszenario: Im Referenzszenario (heutige Situation) beträgt der Anteil von Alkylatbenzin am gesamten Benzinverbrauch im Offroad-Sektor rund 5% (Kapitel 4.4). Unter der Annahme, dass Alkylatbenzin die Benzol-Emissionen um 96% reduziert (Figur 10)<sup>16</sup>, wur-

<sup>16</sup> Für 2-Takt Alkylatbenzin wird hier das Reduktionspotenzial von 4-Takt Alkylatbenzin angenommen.

den die gesamtschweizerischen Benzolemissionen durch den Einsatz von Alkylatbenzin im Jahr 2005 um zirka 2.5 t resp. um 0,25% gegenüber dem Nullszenario vermindert.

- › Alkylatszenario 1: Eine Umfrage bei professionellen Anwendern von Kleingeräten hat ergeben, dass die Mehrheit bereit wäre, Alkylatbenzin einzusetzen. In diesem Szenario wird deshalb von 100% Alkylatbenzin bei sämtlichen Offroad-Geräten im professionellen Sektor ausgegangen. Gegenüber dem Nullszenario könnten mit dieser Massnahme die Benzol-Emissionen im Jahr 2005 um 40 t resp. um 4% gesenkt werden. Über die Hälfte der Benzol-Reduktion würde bei den 2-Takt-Geräten verzeichnet werden.
- › Alkylatszenario 2: Annahme: Durch intensive Informationskampagnen liesse sich der Anteil von Alkylatbenzin im Offroad-Sektor auf 50% steigern. Gegenüber dem Nullszenario hätten mit dieser Massnahme die Benzol-Emissionen im Jahr 2005 um ca. 25 t resp. um 2.5% gesenkt werden können.
- › Trendszenario: Benzolemissionen im Jahr 2010 (ohne Verwendung von Alkylatbenzin) infolge strengerer Abgasvorschriften: Gemäss der mutmasslichen Entwicklung der Abgasvorschriften (BUWAL, 2004) werden sich die Benzolemissionen bis 2010 gegenüber dem Nullszenario um ca. 400 t a<sup>-1</sup> resp. 40% verringern (motorisierten Strassenverkehr um gut 380 t a<sup>-1</sup> und im Offroad-Sektor um rund 15 t a<sup>-1</sup>).

Der Vergleich der Szenarien zeigt deutlich, dass der Einsatz von Alkylatbenzin im Offroad-Sektor auf den gesamtschweizerischen Benzol-Ausstoss heute noch eine geringe Auswirkung hat. Auch eine markante Zunahme des Marktanteils von Alkylatbenzin im Offroad-Sektor (auf etwa 50%) könnte die gesamtschweizerischen Benzol-Emissionen nicht massgebend verringern. Innerhalb des Offroad-Sektors führt diese Massnahme allerdings zu einer deutlicheren Reduktion der Benzolemissionen als die mutmassliche Entwicklung bis ins Jahr 2010 infolge abgasärmerer Motoren. Jedenfalls liegt der Benzol-Ausstoss auch mit einem erhöhten Einsatz von Alkylatbenzin noch deutlich über dem langfristigen Ziel der Eidg. Lufthygiene-Kommission von 100 t Benzol pro Jahr (BUWAL, 2003). Massnahmen, die den gesamten Strassenverkehr betreffen (z.B. Emissionsgrenzwerte) sind letztlich deutlich wirksamer. Allerdings wurde kein Szenario betrachtet, bei dem auch im Strassenverkehr (z.B. Mofa) Alkylatbenzin zum Einsatz käme.



**Figur 14** Benzol-Emissionen in der Schweiz von Personenwagen, Motorrädern (BUWAL, 2004) und Offroad-Geräten (Infras, 2008) und 3 Minderungsszenarien. Werte der Benzol-Emissionen einzelner Sektoren unter verschiedenen Szenarien sind im Annex 5 aufgelistet.

## 7. SYNTHESE UND AUSBLICK

### 7.1. KERNAUSSAGEN

Anhand der zusammengetragenen Information und den Berechnungen der Emissionsminderung von Alkylatbenzin können die unten aufgelisteten Aussagen gemacht werden. Weil die empirische Basis für diese Aussagen beschränkt ist (insbesondere hinsichtlich der Kleingeräte), ist ein quantitativer Vergleich der Emissionsdaten nur unter Vorbehalten möglich. Gleichwohl sind die Daten für die nachfolgenden qualitativen Einschätzungen genügend belastbar:

- › Alkylatbenzin besteht mehrheitlich aus Alkanen (Paraffine). Alkane sind Kohlenwasserstoff-Moleküle, bei denen keine Mehrfachbindungen zwischen den Atomen auftreten. Im Vergleich zu den robusten Aromaten lassen sich Alkane effizienter verbrennen, da sie keine Benzolringe enthalten. Zu den schädlichsten Abgasen gehören insbesondere Benzol, n-Hexan, 1,3-Butadien und Formaldehyd. Benzol ist erwiesenermassen karzinogen und ist als Klasse 1 Karzinogen eingestuft. Ebenso wurde bei den Schadstoffen Formaldehyd, Acetaldehyde, 1-3 Butadien und Ethen eine karzinogene Wirkung nachgewiesen. Diese Stoffe sind gemäss Suva in den Klassen 2 und 3 eingestuft.
- › Einige Messungen zeigen, dass sich durch den Einsatz von Alkylatbenzin die Emissionen von Benzol- und n-Hexan im Vergleich zum Betrieb mit herkömmlichem Benzin um über 80% reduzieren lassen. Dies ist aus gesundheitlicher und lufthygienischer Sicht der Hauptvorteil von Alkylatbenzin. Zudem verringern sich die NO<sub>x</sub>-Emissionen durch den Einsatz von Alkylatbenzin gegenüber herkömmlichem Benzin in geringem Umfang (ca. 20 bis 30%).
- › Die schädlichsten VOCs gilt es sowohl in den Abgasen als auch während des Betankens eines Motors so tief wie möglich zu halten. Die Exponierung ist während dem Betanken von Geräten besonders gross, weil beim Einatmen der Abgase oder bei Hautkontakt Parafinkohlenwasserstoffe in den Blutkreislauf gelangen. Alkylatbenzin ist in diesen Situationen besonders vorteilhaft.
- › Die Abgaskomponenten von Alkylatbenzin sind durch tiefere Ozon-Reaktivitätspotenziale charakterisiert. Theoretische Hochrechnungen zeigen, dass sich mit Alkylatbenzin die bodennahe Ozonbildung gegenüber herkömmlichem Benzin um zirka 40% verringern lässt. Über 98% der ozonbildenden Abgaskomponenten stammen allerdings aus Quellen, wo Al-

kylatbenzin nicht oder nur begrenzt eingesetzt werden kann (namentlich Strassenverkehr und Dieselmotoren).

- › Daneben weist Alkylatbenzin praktische Vorteile auf, wie bessere Lagerungsfähigkeit des Treibstoffs, Schonung des Motors durch besseren Betrieb (geringeres Klopfen), besseres Startverhalten. Dem stehen vor allem zwei Nachteile gegenüber: hohe Kosten (von 4.20 bis 5.50 CHF pro Liter) und begrenzte Verfügbarkeit.
- › Durch den Einsatz von Alkylatbenzin könnten vor allem bei jenen Motorenklassen die karzinogenen Benzol- und andere giftige Abgaskomponenten wirksam verringert werden, deren spezifischer Kohlenwasserstoffausstoss – ausgedrückt in g pro Kilogramm Treibstoff – überdurchschnittlich hoch ist. Den höchsten Kohlenwasserstoffausstoss weisen Kleingeräte des Offroad-Sektors mit 2-Takt-Motoren auf. An zweiter Stelle folgen 2-Takt-Motorräder und Mofas. Deutlich geringer – aber gleichwohl nennenswert – sind die Kohlenwasserstoffemissionen von 4-Takt-Offroad-Motoren und 4-Takt-Motorrädern. Motorräder können aus finanziellen und praktischen Gründen jedoch nicht zu den Haupteinsatzfeldern von Alkylatbenzin gezählt werden (geringe Zahlungsbereitschaft, begrenztes Interesse von Tankstellenbetreibern zum Aufbau der Versorgungsinfrastruktur). Deshalb steht für Alkylatbenzin der Offroad-Bereich im Vordergrund, und hier vor allem die Kleingeräte, die in der Land- und Forstwirtschaft sowie in der Gartenpflege zum Einsatz gelangen.
- › Derzeit werden in der Schweiz jährlich rund 4 Millionen Liter Alkylatbenzin verbraucht (3 Millionen Liter als 2-Takt- und 1 Million Liter als 4-Takt-Alkylatbenzin). Dies entspricht einem Marktanteil im Schweizer Offroad-Sektor von knapp 20% beim 2-Takt- und 2% beim 4-Takt-Benzin. Im professionellen Offroad-Bereich (z.B. Forstwirtschaft) wird Alkylatbenzin breit eingesetzt, im privaten Sektor besteht noch Potenzial für weitere Verbreitung.
- › Die benzinbetriebenen Motoren des Offroad-Sektors – das nächst liegende Einsatzfeld von Alkylatbenzin – waren im Jahr 2005 für rund ein Viertel der Gesamt-HC-Emissionen (Strassenverkehr und Offroad-Sektor) verantwortlich. Ähnlich ist die Situation hinsichtlich der Benzolemissionen. Die NO<sub>x</sub>-Emissionen von benzinbetriebenen Kleingeräten sind demgegenüber aus gesamtschweizerischer Sicht vernachlässigbar gering.
- › Die Luftschadstoffemissionen des Strassenverkehrs nehmen dank technischer Massnahmen – als Folge laufend verschärfter Emissionsgrenzwerte – seit mehreren Jahren kontinuierlich ab. Was im Strassenverkehr seit den 80er Jahren die Regel ist, trifft zunehmend auch für den Offroad-Sektor zu. So emittieren heutige moderne 2-Takt-Kleingeräte beispielsweise rund 6 mal weniger HC-Emissionen als noch vor gut 10 Jahren. Weitere Reduktionen sind absehbar. Der Einsatz von Alkylatbenzin ist grundsätzlich sowohl bei alten wie auch

bei neueren Geräten sinnvoll. Dessen Einsatz ist bei älteren, hinsichtlich Emissionsverhalten weniger ausgereiften Verbrennungsmotoren besonders wirksam, weil die Reduktion - in absoluten Grössen ausgedrückt - ausgeprägter ist als bei modernen Geräten, deren Ausgangsniveau bereits tiefer ist.

- › Neben den Motoren wurde in den letzten Jahren aufgrund entsprechender gesetzlicher Vorgaben auch die Qualität des herkömmlichen Benzins verbessert. Unter anderem wurde der Benzolgehalt im konventionellen Benzin seit 2000 auf 1 Vol.-% reduziert. Der marktübliche Benzolgehalt ging damit von 3 bis 4% auf unter 1% zurück, was eine entsprechende Absenkung der Benzol-Emissionen im Abgas zur Folge hat.
- › Durch intensivierte Informationskampagnen für vermehrten Einsatz von Alkylatbenzin könnten die gesamtschweizerischen Emissionen - namentlich von Benzol - weiter verringert werden. Weit interessanter sind jedoch die Vorteile für den individuellen Anwender, d.h. die Minderung der Schadstoffexposition des Anwenders durch Alkylatbenzin. Da Anwender von Kleingeräten den Abgasen direkt ausgesetzt sind, macht der Einsatz von Alkylatbenzin in diesen Geräten am meisten Sinn. Auch typische moderne 2-Takt-Kleinmotoren emittieren noch gut 10-mal mehr Benzol pro Stunde als ein moderner Personenwagen der Abgasstufe EURO 4. Bei diesem Vergleich muss jedoch berücksichtigt werden, dass Kleinmotoren meistens unter Volllast betrieben werden, was bei Personenwagen selten der Fall ist. Durch Alkylatbenzin könnte dieser Wert drastisch reduziert werden. Als Nebennutzen werden auch die  $\text{NO}_x$ -Emissionen reduziert, wenn auch in geringem Ausmass.

## 7.2. FOLGERUNGEN UND AUSBLICK

- › Die oben beschriebenen Aussagen machen einen breiteren Einsatz von Alkylatbenzin zu einer empfehlenswerten lufthygienischen Massnahme, um die Schadstoff-Exposition beim Arbeiten mit Verbrennungsmotoren zu verringern. Aus gesundheitlicher und lufthygienischer Sicht ist vor allem die Verringerung der Benzol- wie auch der  $\text{NO}_x$ -Emissionen beim Einsatz von Alkylatbenzin hervorzuheben. Positiv wirkt sich das vor allem bei der Anwendung von Kleingeräten des Offroad-Sektors wie z.B. Gartenpflege und Forstwirtschaft aus.
- › Während der Einsatz von Alkylatbenzin im professionellen Bereich schon weitgehend die Regel ist, sollten auch private Anwender dazu angeregt werden, Alkylatbenzin in Kleingeräten zu benutzen. Die Mehrkosten für Alkylatbenzin sind in Anbetracht der zahlreichen praktischen und lufthygienischen Vorteile von Alkylatbenzin auch für private Anwender tragbar. Eine Informationskampagne über gesundheitliche Vor- und Nachteile von Alkylat-

benzin hätte zudem den positiven Nebeneffekt, die Gesellschaft auf die grundsätzliche Problematik der Schadstoffbelastung zu sensibilisieren.

- › Die in diesem Bericht zusammengetragenen Informationen sind genügend belastbar, um diese grundsätzliche Empfehlung zugunsten von Alkylatbenzin abgeben zu können. Allerdings ist einzuräumen, dass die empirische Basis für quantitative Aussagen zu den Auswirkungen auf die Emissionen insbesondere von benzinbetriebenen Kleingeräten begrenzt ist. Weitere Messreihen könnten diese Aussagen untermauern. Diese sollten sich auf VOC und namentlich die kanzerogenen Komponenten konzentrieren, neuere Geräte sowie den heute üblichen Treibstoff (mit einem Benzol-Gehalt <1 Vol.-%) als Vergleichstreibstoff mit einbeziehen.

## ANNEX 1: GEFAHRENBEZEICHNUNG, RISIKO-SÄTZE UND RISIKO ASSESSMENT






BEDEUTUNG DER GEFÄHRSTOFFKENNZEICHNUNG		
Kennbuchstabe	Gefahrensymbol	Bedeutung (Gefahr und Nutzungshinweise)
F+		<b>Gefahr:</b> Selbstentzündliche Stoffe, leichtentzündliche gasförmige Stoffe, feuchtigkeitsempfindliche Stoffe oder brennbare Flüssigkeiten. <b>Handhabung:</b> Kontakt mit Zündquellen/Gefahrenquellen (Luft, Wasser) vermeiden.
T+		<b>Gefahr:</b> Nach Einatmen, Verschlucken oder Aufnahme durch die Haut treten meist Gesundheitsschäden erheblichen Ausmasses oder gar Tod ein. Schon weniger als 25 mg pro Kilogramm Körpergewicht können zum Tod führen. Von so gekennzeichneten Stoffen können zusätzlich noch die Gefahren ausgehen, die unter Xn, Xi und C beschrieben werden; in diesen Fällen müssen diese Symbole nicht zusätzlich angegeben werden. <b>Handhabung:</b> Jeglichen Kontakt mit dem menschlichen Körper vermeiden und bei Unwohlsein sofort den Arzt aufsuchen.
Xn		<b>Gefahr:</b> Bei Aufnahme in den Körper können diese Stoffe Gesundheitsschäden verursachen <b>Handhabung:</b> Kontakt mit dem menschlichen Körper, auch Einatmen der Dämpfe, vermeiden und bei Unwohlsein den Arzt aufsuchen. Von so gekennzeichneten Stoffen können zusätzlich noch die Gefahren ausgehen, die unter Xi beschrieben werden; in diesen Fällen muss dieses Symbol nicht zusätzlich angegeben werden.
O		<b>Gefahr:</b> Stoffe, die brennbare Stoffe entzünden können oder ausgebrochene Brände fördern und so die Brandbekämpfung erschweren. <b>Handhabung:</b> Jeden Kontakt mit brennbaren Stoffen vermeiden.
C		<b>Gefahr:</b> Lebendes Gewebe, aber auch viele Materialien werden bei Kontakt mit dieser Chemikalie zerstört. Von so gekennzeichneten Stoffen können zusätzlich noch die Gefahren ausgehen, die unter Xn und Xi beschrieben werden; in diesen Fällen müssen diese Symbole nicht zusätzlich angegeben werden. <b>Handhabung:</b> Dämpfe nicht einatmen und Berührung mit Haut, Augen und Kleidung vermeiden.

Table 8 Gefahrstoffkennzeichnung nach europäischer Norm.



<b>RISIKO-SÄTZE</b>	
<b>R-Satz</b>	<b>Beschreibung</b>
R 10	Entzündlich.
R 11	Leichtentzündlich.
R 12	Hochentzündlich.
R 20	Gesundheitsschädlich beim Einatmen.
R 21	Gesundheitsschädlich bei Berührung mit der Haut.
R 23	Giftig beim Einatmen.
R 24	Giftig bei Berührung mit der Haut.
R 25	Giftig beim Verschlucken.
R 34	Verursacht Verätzungen.
R 36	Reizt die Augen.
R 37	Reizt die Atmungsorgane.
R 38	Reizt die Haut.
R 40	Verdacht auf krebserzeugende Wirkung.
R 43	Sensibilisierung durch Hautkontakt möglich.
R 45	Kann Krebs erzeugen.
R 46	Kann vererbare Schäden verursachen.
R 48	Gefahr ernster Gesundheitsschäden bei längerer Exposition.
R 51	Giftig für Wasserorganismen.
R 53	Kann in Gewässern längerfristig schädliche Wirkungen haben.
R 61	Kann das Kind im Mutterleib schädigen.
R 62	Kann möglicherweise die Fortpflanzungsfähigkeit beeinträchtigen.
R 63	Kann das Kind im Mutterleib möglicherweise schädigen.
R 65	Gesundheitsschädlich: Kann beim Verschlucken Lungenschäden verursachen.
R 67	Dämpfe können Schläfrigkeit und Benommenheit verursachen.

**Tabelle 9** Risiko-Sätze und deren Bedeutung.

RISIKO ASSESSMENT					
Abgas	Unit Risk pro µg/m <sup>3</sup> A	Emission Konv. Benzin mg/m <sup>3</sup> B	Emission Alkylatbenzin mg/m <sup>3</sup> C	Gesundheitsrisiko mit konv. Benzin D=A*B	Gesundheitsrisiko mit Alkylatbenzin E=B*C
<b>2-Takt Motorsäge (Stihl 44C, 70,7 cm<sup>3</sup>; 3.8 kW)</b>					
Acetaldehyd	2.0E-06	20	1.5	4.00E-05	3.00E-06
Benzol	4.1E-06	208	14	8.53E-04	5.74E-05
Formaldehyd	2.8E-07	162	141	4.54E-05	3.96E-05
Summe alle				9.38E-04	1.00E-04

**Tabelle 10** Risiko-Assessment für die Anwender bei Betrieb einer 2-Takt-Motorsäge (Annex 3) mit herkömmlichem Benzin und mit Alkylatbenzin. In Kolonne A sind die Unit-Risks aufgelistet. In Kolonnen B und C sind die gemessenen Emissionen der Geräte betrieben mit herkömmlichem Benzin und mit Alkylatbenzin aufgelistet (TüV-Bayern 1989). In Kolonne D und E ist das Gesundheitsrisiko für jedes Abgas bei Betrieb mit herkömmlichem und mit Alkylatbenzin aufgelistet. Da das Gesundheitsrisiko anhand von Emissionen berechnet wurde dürfen die Werte in Kolonne D und E nur *relativ* interpretiert werden.

## ANNEX 2: TREIBSTOFFVERBRAUCH UND BETRIEBSSTUNDEN

TREIBSTOFFVERBRAUCH UND BETRIEBSSTUNDEN (2-TAKTER UND SCHIFFE)					
Fam.	Gerät	Grösse	Motor	BS [h a <sup>-1</sup> ]	TV [kg h <sup>-1</sup> ]
B	Stampfer, Vibratoren handge- führt	>50 ccm	2T	300	0.40
F	Andere Kleingeräte	>50 ccm	2T	60	0.67
F	Freischneidegeräte	20-50 ccm	2T	150	0.79
F	Motorsägen FW	>50 ccm	2T	150	1.89
G/H	Blasgeräte (hobby)	<20 ccm	2T	6	0.17
G/H	Blasgeräte (hobby)	20-50 ccm	2T	6	0.33
G/H	Blasgeräte (prof)	20-50 ccm	2T	150	0.34
G/H	Bohrgeräte (prof)	>50 ccm	2T	150	0.48
G/H	Heckenscheren (hobby)	<20 ccm	2T	6	0.17
G/H	Heckenscheren (hobby)	20-50 ccm	2T	6	0.33
G/H	Heckenscheren (prof)	20-50 ccm	2T	150	0.33
G/H	Motorsägen (hobby)	20-50 ccm	2T	6	0.50
G/H	Motorsägen (prof)	>50 ccm	2T	150	1.91
G/H	Motorsägen (prof)	20-50 ccm	2T	150	0.55
G/H	Motorsensen, Rasentrimmer, Freischneider (hobby)	<20 ccm	2T	6	0.17
G/H	Motorsensen, Rasentrimmer, Freischneider (hobby)	20-50 ccm	2T	6	0.33
G/H	Motorsensen, Rasentrimmer, Freischneider (prof)	20-50 ccm	2T	200	0.33
G/H	Trennschleifgeräte (prof)	20-50 ccm	2T	60	0.51
L	Motorsägen LW	>50 ccm	2T	20	1.78
S	Berufsfischer & Arbeitsboote	<4.4 kW	2T	500	0.46
S	Miet- & private Motorboote	<4.4 kW	2T	30	0.46
S	Miet- & private Motorboote	4.4-7.4 kW	2T	30	0.92
S	Miet- & private Motorboote	7.4-37 kW	2T	30	3.19
S	Segelboote mit Motor	<4.4 kW	2T	30	0.46
S	Segelboote mit Motor	4.4-7.4 kW	2T	30	0.92
S	Miet- & private Motorboote	7.4-37 kW	4T	30	0.39
S	Miet- & private Motorboote	>100 kW	4T	30	24.68
S	Miet- & private Motorboote	37-74 kW	4T	30	6.79
S	Miet- & private Motorboote	37-74 kW	4T	30	0.78
S	Miet- & private Motorboote	37-74 kW	4T	30	2.72
S	Miet- & private Motorboote	74-100 kW	4T	30	10.74

**Tabelle 11** Treibstoffverbrauch und Betriebsstunden im Offroad-Sektor. B steht für Baumaschinen, F für Forstwirtschaft, G/H für Gartenpflege/Hobby, L für Landwirtschaft, S für Schiffe, 2T für 2-Takt, 4T für 4-Takt, BS für Betriebsstunden, TV für Treibstoffverbrauch. Nach (Infras, 2008).

TREIBSTOFFVERBRAUCH UND BETRIEBSTUNDEN (4-TAKTER)					
Fam.	Gerät	Grösse	Motor	BZ [h a <sup>-1</sup> ]	TV [g h <sup>-1</sup> ]
B	Beton- / Belagfräsen	>225 ccm	4T	467	3.16
B	Notstromaggregate / Generatoren	>225 ccm	4T	80	1.95
B	Pumpen aller Art	>225 ccm	4T	146	0.64
B	Pumpen aller Art	100-225 ccm	4T	146	0.32
B	Stampfer, Vibratoren handgeführt	>225 ccm	4T	300	0.55
B	Stampfer, Vibratoren handgeführt	100-225 ccm	4T	300	0.33
G/H	Aufsitzmäher (hobby)	>225 ccm	4T	13	1.08
G/H	Aufsitzmäher (prof)	>225 ccm	4T	200	1.21
G/H	Blasgeräte (hobby)	<66 ccm	4T	6	0.15
G/H	Blasgeräte (prof)	<66 ccm	4T	150	0.29
G/H	Bohrgeräte (prof)	66-100 ccm	4T	150	0.41
G/H	Fräsen/Motorhacken (hobby)	100-225 ccm	4T	6	0.94
G/H	Fräsen/Motorhacken (prof)	100-225 ccm	4T	150	1.08
G/H	Häcksler (hobby)	100-225 ccm	4T	3	0.89
G/H	Häcksler (prof)	66-100 ccm	4T	80	0.39
G/H	Motorschleppen (hobby)	100-225 ccm	4T	10	0.90
G/H	Motorsensen, Rasentrimmer, Freischneider (hobby)	<66 ccm	4T	6	0.23
G/H	Motorsensen, Rasentrimmer, Freischneider (prof)	<66 ccm	4T	200	0.29
G/H	Rasenmäher (hobby)	100-225 ccm	4T	13	0.54
G/H	Rasenmäher (prof)	100-225 ccm	4T	100	0.59
G/H	Reinigungsgeräte (hobby)	66-100 ccm	4T	20	0.21
G/H	Reinigungsgeräte (prof)	66-100 ccm	4T	300	0.24
G/H	Schneefräsen (hobby)	66-100 ccm	4T	48	0.39
G/H	Schneefräsen (prof)	66-100 ccm	4T	190	0.41
G/H	Vertikutierer (hobby)	66-100 ccm	4T	3	0.20
G/H	Vertikutierer (prof)	100-225 ccm	4T	500	0.61
I	Gabelstapler aller Art	>225 ccm	4T	720	3.08
I	Traktoren Ind	>225 ccm	4T	300	2.75
L	Einachsmäher/Motoreinachser	>225 ccm	4T	120	1.76
L	Traktoren (hobby)	>225 ccm	4T	15	3.80
M	andere Boote	7.4-37 kW	4T	95	3.01
S	Berufsfischer & Arbeitsboote	4.4-7.4 kW	4T	500	0.43
S	Berufsfischer & Arbeitsboote	>100 kW	4T	500	27.36
S	Berufsfischer & Arbeitsboote	37-74 kW	4T	500	7.52
S	Berufsfischer & Arbeitsboote	4.4-7.4 kW	4T	500	0.86
S	Berufsfischer & Arbeitsboote	7.4-37 kW	4T	500	3.01
S	Segelboote mit Motor	74-100 kW	4T	30	0.39
S	Segelboote mit Motor	74-100 kW	4T	30	0.78
S	Segelboote mit Motor	7.4-37 kW	4T	30	2.72

**Table 12** Treibstoffverbrauch und Betriebsstunden im Offroad-Sektor. B steht für Baumaschinen, G/H für Gartenpflege/Hobby, I für Industrie, L für Landwirtschaft, M für Militär, S für Schiffe, 2T für 2-Takt, 4T für 4-Takt, BS für Betriebsstunden, TV für Treibstoffverbrauch. Nach (Infras, 2008).

## ANNEX 3: EMISSIONEN VON 2-TAKT GERÄTEN

EMISSIONEN VON 2-TAKT-MOTORGERÄTEN					
Gerät	Abgas	Einheit	Konv. Benzin	Alkylatbenzin	Referenz
Motorsäge Husqvarna 242 XP 41.6 cm <sup>3</sup> 2.4 kW	Formaldehyd	g kWh <sup>-1</sup>	1.3	1.6	Magnusson (2002)
	Acetaldehyd	g kWh <sup>-1</sup>	0.26	0.29	
	Benzaldehyd	g kWh <sup>-1</sup>	0.30	<0.001	
	Toluolaldehyd	g kWh <sup>-1</sup>	0.48	<0.001	
	CO	g kWh <sup>-1</sup>	240	210	
	HC	g kWh <sup>-1</sup>	140	110	
	NO <sub>x</sub>	g kWh <sup>-1</sup>	1.7	1.2	
Motorsäge 55 cm <sup>3</sup> (keine Angaben)	CO	g kWh <sup>-1</sup>	360	380	Murtonen et al. (2003)
	HC	g kWh <sup>-1</sup>	140	130	
	NO <sub>x</sub>	g kWh <sup>-1</sup>	1.2	0.7	
Motorsäge HVA 364, 45 cm <sup>3</sup> 2.3 kW	CO	g h <sup>-1</sup>	879	816	BNM-Research (2000)
	HC	g h <sup>-1</sup>	284	310	
	NO <sub>x</sub>	g h <sup>-1</sup>	27	18	
Motorsäge Stihl, 044C 70.7 cm <sup>3</sup> 3.8 kW	CO	Vol. %	5.3	4.2	TÜV Bayern (1989)
	CO <sub>2</sub>	Vol. %	9.9	9.7	
	Formaldehyd	mg m <sup>-3</sup>	174/195/118	115/241/68	
	Acetaldehyd	mg m <sup>-3</sup>	25/15/2	1/2/82	
	Benzol	mg m <sup>-3</sup>	119/140/367	13/15/14	
	Toluol	mg m <sup>-3</sup>	824/945/1177	18/18/16	
Rasentrimmer A	CO <sub>2</sub>	Vol.-%	11.11	11.69	EMPA (1997)
	CO	Vol.-%	4.69	2.73	
	HC	ppm	2017	1975	
	NO <sub>x</sub>	ppm	29	28	
Rasentrimmer B	CO <sub>2</sub>	Vol.-%	6.75	8.44	
	CO	Vol.-%	6.09	2.62	
	HC	ppm	4199	4779	
	NO <sub>x</sub>	ppm	25	32	
Motorsäge Stihl, MS181 31.8 cm <sup>3</sup> 1.5 kW	CO	Vol. %	4.9	4.4	Stihl (2008)
	CO <sub>2</sub>	Vol. %	10.3	9.5	
	HC	Vol. %	28.7	27.3	
Motorsäge Stihl, MS441 70.7 cm <sup>3</sup> 4.1 kW	CO	Vol. %	6.5	5.5	
	CO <sub>2</sub>	Vol. %	8.5	7.8	
	HC	Vol. %	42.3	39.8	
Trennschleifer Stihl, TS410/TS420 66.7 cm <sup>3</sup> 4.4 kW	CO	Vol. %	6.1	5.7	
	CO <sub>2</sub>	Vol. %	8.5	8.0	
	HC	g kWh <sup>-1</sup>	63	58	
	NO <sub>x</sub>	g kWh <sup>-1</sup>	1.01	0.71	
Motorsense Stihl, FS 130 36.3 cm <sup>3</sup> 1.4 kW	CO	Vol. %	5.47	5.15	
	HC	g kWh <sup>-1</sup>	11.67	10.73	
	NO <sub>x</sub>	g kWh <sup>-1</sup>	4.52	3.38	

**Tabelle 13** Emissionen von verschiedenen Motorgeräten beim Betrieb mit konventionellem Benzin und Alkylatbenzin. Grau unterlegte Messwerte wurden nicht berücksichtigt, da es sich evt. um Ausreisser handeln könnte.

EMISSIONEN EINES 2-TAKT-MOFAS					
Abgas	Einheit	Mit Kraftstoffeinspritzung		Mit Vergaser	
		Konv. Benzin	Alkylatbenzin	Konv. Benzin	Alkylatbenzin
CO	g km <sup>-1</sup>	0.142	0.09	1.358	1.124
HC	g km <sup>-1</sup>	0.302	0.28	0.695	0.671
NO <sub>x</sub>	g km <sup>-1</sup>	0.28	0.2	0.08	0.054
PM	g km <sup>-1</sup>	0.082	0.09	0.004	0.003

**Tabelle 14** Emissionen eines Mofas (A) mit Kraftstoffeinspritzung (Peugeot, Looxor TSDI, 50 cm<sup>3</sup>, 3.6 kW) und eines Mofas mit Vergaser (Peugeot, 50 cm<sup>3</sup>, 3.6 kW) beim Betrieb mit konventionellem Benzin und Alkylatbenzin. Daten aus Czerwinski et al. (2005).

## ANNEX 4: EMISSIONEN VON 4-TAKT GERÄTEN

EMISSIONEN EINES 4-TAKT-MOTORMÄHERS															
Abgas	EMPA (2001)					Stadler et al. (1999)					Mayer et al. (1999)				
	Einheit	Konv. Benzin	Kat.	Alkylatbenzin	Kat. und Alkylatb.	Einheit	Konv. Benzin	Kat.	Alkylatbenzin	Kat. und Alkylatb.	Einheit	Konv. Benzin	Kat.	Alkylatbenzin	Kat. und Alkylatb.
HC	g/h	32.7	1.2	36.8	2.1	g/kWh	8.54	0.68	8.09	0.87	g/kWh	8.5	0.7	8.1	0.1
NO <sub>x</sub>	g/h	24.4	45.3	21.4	40.7	g/kWh	5.1	6.6	3.3	5	g/kWh	5.1	6.6	3.2	5
CO	g/h	865	12.6	802	12.8	g/kWh	229	15.8	215.5	15.2	g/kWh	229	15.8	215	15.2
Verbrauch	kg/h	1.92	1.83	1.81	1.65	g/kWh	448	401	441	392	g/kWh	448	401	440	391
PAK	µg/h	194	12	57	19	µg/h	194	12	57	19	mg/h	2.569	0.1	0.401	0.18
Formaldehyd	mg/h	382	19.9	773	81	mg/h	382	19.9	773	8.1	mg/h	339	2.6	818	83
Acetaldehyd	mg/h	63	5.2	134	8.9	mg/h	63	5.2	134	8.9	mg/h	62	3.7	110	7.4
1,3-Butadien	mg/h	14.4	0.3	23.7	0.4	mg/h	14	0.26	23.7	0.44	mg/h	13	0.3	13.2	0.6
n-Hexan	mg/h	36	1.5	4.5	0.2	mg/h	36	1.51	4.5	0.18	mg/h	43	1	3.3	0.1
Benzol	mg/h	186	4.7	7.2	0.5	mg/h	186	4.7	7.2	0.53	mg/h	216	4.8	6.5	0.7
Toluol	mg/h	379	5.8	4.4	0.3	mg/h	379	5.8	4.4	0.27	mg/h	371	7.8	3.2	0.2
Ethylbenzol	mg/h	56	1.1	0.1	0.1	mg/h	56	1.1	0.1	0.1	mg/h	74	1.6	0.9	0.1
Xylole	mg/h	321	5.8	0.1	0.1	mg/h	321	5.8	0.1	0.1	mg/h	431	8.7	3.5	0.1
Ethen	mg/h	258	5.7	274	8.3	-	-	-	-	-	mg/h	226	4.8	260	10.5
Ethin	mg/h	142	0.5	150	0.7	-	-	-	-	-	mg/h	145	0.9	158	1.6

**Tabelle 15** Emissionen eines Motormäher (RADIP, 479 cm<sup>3</sup>, 8-10 kW) betrieben mit konventionellem Benzin, mit Katalysator, betrieben mit Alkylatbenzin und beim gleichzeitigen Einsatz von Katalysator und Alkylatbenzin. Alle Messungen wurden unter Teillast durchgeführt. Datenquelle ist in der Tabelle angegeben.

EMISSIONEN EINES KLIPPO COMET RASENMÄHERS					
Abgas	Einheit	Konv. Benzin	Kat.	Alkylat-benzin	Kat. und Alkylatb.
HC	g h <sup>-1</sup>	22	16	26	17
NO <sub>x</sub>	g h <sup>-1</sup>	2.6	1.4	2	1.2
CO	g h <sup>-1</sup>	583	401	562	318
Verbrauch	L h <sup>-1</sup>	0.79	0.82	0.89	0.89
partikulär	g h <sup>-1</sup>	0.8	0.5	0.8	0.4
Methan	g h <sup>-1</sup>	2.1	2.58	3.85	3.86
Ethan	g h <sup>-1</sup>	0.21	0.11	0.44	0.26
Ethylen	g h <sup>-1</sup>	1.56	1.61	2.27	2.08
Ethanol	g h <sup>-1</sup>	1.16	3.3	1.63	3.4
Distickstoffoxid	g h <sup>-1</sup>	0.31	0.48	0.45	0.38
Summe part. PAK	µg h <sup>-1</sup>	2212	207	683	90
Summe vol. PAK	µg h <sup>-1</sup>	1809	626	650	396

**Tabelle 16** Emissionen eines Rasenmähers (Klipco Comet, 190 cm<sup>3</sup>, 2.9 kW) betrieben mit konventionellem Benzin, mit Katalysator, betrieben mit Alkylatbenzin und beim gleichzeitigen Einsatz von Katalysator und Alkylatbenzin. Alle Messungen wurden unter Teillast durchgeführt. Daten aus Christensen et al. (2001).

EMISSIONEN EINES HONDA GX200 RASENMÄHERS						
Last	Abgas	Einheit	Konv. Benzin	Kat.	Alkylat-benzin	Kat. und Alkylatb.
50%	HC	g kWh <sup>-1</sup>	5.6	2.5	4.6	2.2
50%	CO	g kWh <sup>-1</sup>	274	138	258	127
50%	NO <sub>x</sub>	g kWh <sup>-1</sup>	-	-	-	-
75%	HC	g kWh <sup>-1</sup>	4.5	1.8	3.8	1.5
75%	CO	g kWh <sup>-1</sup>	206	113	190	91
75%	NO <sub>x</sub>	g kWh <sup>-1</sup>	9	0.7	7.2	0.3
100%	HC	g kWh <sup>-1</sup>	4.7	2.5	4.1	2.1
100%	CO	g kWh <sup>-1</sup>	277	201	250	170
100%	NO <sub>x</sub>	g kWh <sup>-1</sup>	9.8	1	8.5	0.6

**Tabelle 17** Emissionen eines Rasenmähers (Honda GX200, 200 cm<sup>3</sup>, 6.5 PS) betrieben mit konventionellem Benzin, mit Katalysator, betrieben mit Alkylatbenzin und beim gleichzeitigen Einsatz von Katalysator und Alkylatbenzin. Alle Messungen wurden bei 3000 rpm durchgeführt. Daten aus BNM-Research (1999).



## ANNEX 5: MINDERUNGSSZENARIEN DER SCHWEIZERISCHEN BENZOL-EMISSIONEN

<b>SZENARIEN DER BENZOL-EMISSIONEN IN DER SCHWEIZ</b>					
<b>In Tonnen pro Jahr</b>	<b>Null-szenario</b>	<b>Referenz-szenario</b>	<b>Alkylat-szenario1</b>	<b>Alkylat-szenario2</b>	<b>Trend-szenario</b>
Personenwagen	708	708	708	708	381
Motorräder	238	238	238	238	183
Offroad (Benzin, 4-Takt)	16.1	15.3	4.2	8.1	13.8
Offroad (Benzin, 2-Takt)	31.4	29.8	3.5	15.7	19.9
<b>Total</b>	<b>994</b>	<b>991</b>	<b>954</b>	<b>970</b>	<b>598</b>

**Tabelle 18** Benzol-Emissionen in der Schweiz von Personenwagen, Motorrädern (BUWAL, 2004) und Offroad-Geräten (Infras, 2008) unter 4 Minderungsszenarien.

## LITERATUR

- AGROLA 2005:** Spezifikation Benzin Bleifrei 95, AGROLA, Brenn- und Treibstoffe, St. Gallen, [http://www.agrolasq.ch/spezifikation\\_bleifrei95.htm](http://www.agrolasq.ch/spezifikation_bleifrei95.htm).
- ASPEN 2007:** Schulungsmaterial für Aspen-Produkte, Aspen Petroleum AB, Hindås, 26.
- Baldauf, R., C. Fortune, J. Weinstain, M. Wheeler and F. Blanchard 2006:** Air contaminant exposures during the operation of lawn and garden equipment. *Journal of exposure analysis and environmental epidemiology* 16: 362-370.
- BFS 2007:** Mobilität in der Schweiz - Ergebnisse des Mikrozensus 2005 zum Verkehrsverhalten, Bundesamt für Statistik, Neuchâtel, 100.
- BNM-Research 1999:** Emissionsmätningar pa Honda GX200, Segmon, 1.
- BNM-Research 2000:** Engine tests with exhaust analysis on HVA 346 Chainsaw run on EU-Cert fuel and Aspen Alkylate based fuel, ASPEN-Petrol, Segmon, 8.
- BUWAL 1997:** Offroad-Motoren: Abgase vermindern. Report No. 1/97 Sonderdruck, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern, 9.
- BUWAL 1999:** Aromatenfreie Gerätebenzine lassen Maschinisten aufatmen, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern.
- BUWAL 2003:** Benzol in der Schweiz. Report No. 350, Bundesamt für Umwelt, Bern.
- BUWAL 2004:** Luftschadstoffemissionen des Strassenverkehrs 1980 - 2030. Report No. 355, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern, 103.
- Carter, W. P. L. 1994:** Development of ozone reactivity scales for volatile organic compounds. *Journal of the air and waste management association* 44: 881-899.
- Christensen, A., R. Westerholm and J. Almén 2001:** Measurement of regulated and unregulated exhaust emissions from a lawn mower with and without an oxidizing catalyst: a comparison of two different fuels. *Environ. Sci. Technol.* 35: 2166-2170.
- Czerwinski, J., P. Comte, J. L. Pétermann, Y. Zimmerli, P. Wili and M. Clénin 2005:** Influences on particle emissions of modern 2-stroke scooters - 1st report of the project A/2004, Hochschule für Technik und Informatik, Bundesamt für Umwelt, Nidau, 41.
- EMPA 1997:** Abgasvergleichsmessungen. In, p Persönliche Mitteilung.
- EMPA 2001:** Abgasminderungsmassnahmen Balkenmäher: VOC- und PAH-Messungen. Report No. 172938, Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt, Wald und Landschaft, Dübendorf, 25.

- EMPA 2004:** Nachführung der Emissionsgrundlagen Strassenverkehr - Ergänzung der Messdaten auf das Bezugsjahr 2000 Zweiräder Standardprogramm. Report No. 202114b, Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, Dübendorf, 93.
- EPA 2005:** Health effects information used in cancer and noncancer risk characterization for the 1999 National-Scale Assessment, US Environmental protection agency, Washington, DC, 13.
- EWG 1967:** Richtlinie 67/548/EWG des Rates zur Angleichung der Rechts- und Verwaltungsvorschriften für die Einstufung, Verpackung und Kennzeichnung gefährlicher Stoffe vom 27. Juni 1967. Report No. L 196, Europäische Wirtschaftsgemeinschaft (EWG), 15.
- IARC 2007:** Overall evaluations of carcinogenicity to humans, International agency for research on cancer, Lyon, 26, <http://monographs.iarc.fr>.
- Infras 2008:** Schadstoffemissionen und Treibstoffverbrauch des Offroad-Sektors, Infras AG, Bern, 156.
- Jordi, B. 2003:** Am Tankfüllstutzen lauert das Krebsrisiko. Umwelt und Gesundheit 1: 14-15.
- KMU 1999:** Verbesserung der Luftqualität durch den Einsatz von 2-Takt Spezialbenzin bei Motorsägen, Dienststelle für Wald und Landschaft, Brig-Glis, 8.
- Magnusson, R. 2002:** The influence of fuel and lubricant on exhaust emissions from small two-stroke spark-ignition engines. Ph.D. thesis, Swedish University of Agricultural Sciences, Umea, 46.
- Mayer, A., J. Czerwinski, M. Wyser, E. Stadler, U. Wolfensberger, U. Matter, P. Mattrel, G. Hühwohl and A. Schindler 1999:** Best available technology for emission reduction of small 4S-SI-engines. Small engine technology conference, Madison, Wisconsin, p 10.
- Murtonen, T. and N. O. Nylund 2003:** Fuel effects on emissions from non-road engines, VTT Processes.
- ÖAW 1997:** Flüchtige Kohlenwasserstoffe in der Atmosphäre - Entstehung, Verhalten und Wirkung. Report No. GZ. 01 1800/4-I/7/94, Österreichische Akademie der Wissenschaften, Wien, 772.
- Östermark, U. 1996:** Alkylate petrol - environmental aspects of volatile hydrocarbon emissions. Ph.D. thesis, Chalmers University of Technology, Göteborg, 92.
- Östermark, U. and G. Petersson 1993:** Volatile hydrocarbons in exhaust from alkylate-based petrol. Chemosphere 27: 1719-1728.
- Pelley, J. 2008:** EPA toxicity risk assessments in crisis. Environmental science and technology 1: 4620

- SMU 2006:** Gerätebenzin schont Gesundheit und Umwelt, Schweizerische Metall-Union, Zürich, 3.
- Stadler, E., U. Wolfensberger and I. Schiess 1999:** Emissionsminderung bei kleinen Viertakt-Benzinmotoren. Report No. 541, Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik, Tänikon, 1-12.
- Stihl 2008:** Emissionsverhalten von Kleinmotoren mit Alkylat-Sonderkraftstoff. Fachgespräch über Alkylatbenzin. ANDREAS STIHL AG & Co. KG, Waiblingen, p 25.
- Suva 2007:** Grenzwerte am Arbeitsplatz 2007, Schweizerische Unfallversicherungsanstalt, Luzern, 151, [www.suva.ch/waswo](http://www.suva.ch/waswo).
- ToxProbe 2002:** Potential for occupational and environmental exposure to ten carcinogens in Toronto, ToxProbe Inc. for Toronto Public Health, 241.
- TÜV-Bayern 1989:** Emissionsmessungen an einem Zweitaktmotor beim Betrieb mit verschiedenen Betriebsstoffen, im Auftrag von Stihl AG & CO. KG, München und Weiblingen, 10.
- Weiger, F. and A. Barth 1992:** Neue Messungen bei Motorsägenabgasen. Allgemeine Forstzeitung 23: 1214- 1216.