

Bericht Nr. 5'214'030'511

Biosynthetisches Benzin für den Einsatz in klassischen Fahrzeugen

Material- und Ölverträglichkeit sowie Fahrversuche



AMAG Classic: Dino Graf, Reto Mattenberger, René Dörig

Motorex: Dr. Markus Kurzwart, Fabrice Duclos

Empa: Christian Bach, Thomas Hilfiker, Roland Spühler, Mathias Huber

Auftraggeber: AMAG Classic, Schinznach-Bad

Schinznach-Bad, Langenthal und Dübendorf, den 7. März 2024

Inhalt

1. Zusammenfassung	3
2. Untersuchte Treibstoffe.....	5
2.1 Eingesetzte Treibstoffe	5
3. Materialverträglichkeit	9
3.1 Prüfobjekte.....	9
3.2 Versuchsaufbau	9
3.3 Ergebnisse der Materialverträglichkeitsuntersuchungen.....	10
4. Untersuchung der Abgasemissionen.....	14
4.1 Testfahrzeug und Versuchsaufbau.....	14
4.2 Ergebnisse	15
5. Radleistungsmessung	16
5.1 Testfahrzeug und Versuchsaufbau.....	16
5.2 Ergebnisse der statischen Radleistungsmessung.....	16
5.3 Ergebnisse der dynamischen Radleistungsmessung.....	17
6. Fahrversuche.....	18
6.1 Versuchsfahrzeuge.....	18
6.2 Ergebnisse der Fahrversuche.....	19

1. Zusammenfassung

Auch wenn Oldtimerfahrzeuge aufgrund ihrer vergleichsweise geringen Anzahl und niedrigen Fahrleistung insgesamt nur wenig Kohlendioxid (CO₂) emittieren, müssen auch sie ihren Beitrag zur Reduktion der Klimabelastung leisten. Synthetische, auf erneuerbarer Energie basierende Treibstoffe stellen eine solche Möglichkeit dar, bei der die historische Eigenart dieser Fahrzeuge vollumfänglich gewahrt bleibt.

Während der Einsatz synthetischer Treibstoffe bei modernen Fahrzeugen als unkritisch gilt, war dies bisher für klassische Fahrzeuge nicht so klar. Die AMAG Classic, als Kompetenzzentrum für Oldtimerfahrzeuge der AMAG Gruppe, hat deshalb in Zusammenarbeit mit der Empa und Motorex Untersuchungen durchgeführt, um diesbezüglich Klarheit zu schaffen. Schlussendlich zeigte sich für diesen Ansatz ein durchwegs positives Bild. Alle während der Projektdurchführung aufgetretenen Auffälligkeiten konnten geklärt werden. Aufgrund der Resultate kann der Einsatz von synthetischem Benzin zumindest bei typischen Oldtimerfahrzeugen als unbedenklich eingestuft werden. Die Material- und Oelverträglichkeitsuntersuchungen wie auch die Abgas-, Motorleistungs- und Fahrversuche zeigten praktisch keine Abweichungen zum Betrieb mit fossilem Benzin. Ob dieser generelle Befund auch für spezielle Oldtimerfahrzeuge wie Vorkriegsfahrzeuge, historische Rennfahrzeuge oder Fahrzeuge mit selten eingesetzten Materialien gilt, muss künftig allenfalls im Einzelfall geklärt werden; die vorliegende Studie hat aber wertvolle Erkenntnisse zum Aufbau solcher Untersuchungen gebracht, die auch für künftige Abklärungen zur Verfügung stehen.

Als Versuchstreibstoff wurde ein auf erneuerbarem Methanol basierendes, biosynthetisches Benzin ausgewählt, wie es künftig auf dem Markt angeboten werden könnte. Das Methanol kann seinen energetischen Ursprung wie im vorliegenden Fall auf biogener Basis (z.B. Holz oder anderer Biomasse) wie auch auf erneuerbarer Elektrizität haben. In beiden Fällen wird die anschliessende Umwandlung in einem Methanol-to-Gasoline-Verfahren jedoch ähnlich sein.

Die detaillierte Analyse des verwendeten biosynthetischen Benzins und des fossilen Referenzbenzins hat gezeigt, dass sich die beiden Treibstoffqualitäten hinsichtlich Zusammensetzung lediglich durch einen knapp drei Mal höheren Anteil an Methyl-tert-Butylether (MTBE) im biosynthetischen Benzin unterscheiden. MTBE wird zur Erhöhung der Oktanzahl oftmals auch fossilem Benzin beigemischt. Aufgrund seiner Molekülstruktur weist MTBE eine etwas höhere Polarität auf als fossiles Benzin, die die Lösungskraft (Elution) verstärkt. Der Unterschied zu fossilem Benzin ist aber wesentlich geringer als bei Methanol oder Ethanol. In der vorliegenden Studie wurde deshalb primär untersucht, wie sich der erhöhte MTBE-Anteil auf die physikalischen, chemischen und thermodynamischen Eigenschaften des biosynthetischen Benzins und schlussendlich auf den Betrieb von Oldtimern mit biosynthetischem Benzin auswirkt.

Die erhöhte Löslichkeit zeigte sich bereits bei den Materialverträglichkeitsuntersuchungen. Die im zwar gereinigten aber gebrauchten Zustand angelieferten Bauteile führten im Kontakt mit dem biosynthetischen Benzin teilweise zu einer leichten Trübung des ansonsten klaren Treibstoffs. Eine Schädigung oder Veränderung von Oberflächen, Farb- oder Materialschichten oder auch andere Auswirkungen wie ein schwächeres oder stärkeres Quellverhalten konnte nicht festgestellt werden; weder bei Papier-, Kunststoff-, Gummi- oder Metall-basierten Materialien.

Auch bei den Abgas-, Verbrauchs- und Motorleistungsmessungen sowie bei den Fahrversuchen mit zwei unterschiedlichen Veteranenfahrzeugen in Kurzstrecken, Autobahnfahrten, Fahrten über Pässe oder bei Fahrten nach längeren Stillstandszeiten - wie dies für Oldtimerfahrzeuge typisch ist - konnten keine Veränderungen gegenüber dem Betrieb mit fossilen Benzin festgestellt werden. Dies gilt für das Start- und Abschaltverhalten, das Ansprechverhalten und das Leistungsverhalten.

Aufgrund der etwas höheren Löslichkeit von MTBE im Vergleich zu fossilem Benzin wurden bei beiden Fahrzeugen in regelmässigen Abständen Oelproben genommen und analysiert. Ein besonderes Interesse galt der bei Oldtimerfahrzeugen im Vergleich zu modernen Fahrzeugen ausgeprägteren Benzinverdünnung, die zu einem Viskositätsabfall des Motorenöls führt. Dabei zeigte sich ein vergleichbares Verhalten, wie mit fossilem Benzin: die Verdünnung mit biosynthetischem Benzin trat im gleichen Mass auf wie bei fossilem Benzin; dieses konnte mit Fahrten bei höheren Motorlasten aber auch wieder ausgedampft werden, wie bei herkömmlichem Benzin. Dieser durch das Siedeverhalten antizipierte Effekt zeigte sich bei der dritten Analyse des Motorenöls bei einem Versuchsfahrzeug, als die Viskositäts- und Flammpunktwerte des Motorenöls fast wieder die Werte des Frischöls erreichten.

Etwas aufwändiger gestalteten sich Abklärungen zu stark ansteigenden Eisen- und Bleianteilen im Motorenöl bei einem der beiden Versuchsfahrzeuge. Durch das Ausfiltern der Feststoffe aus den Oelproben mit anschliessender Untersuchung der Rückstände konnte jedoch Entwarnung gegeben werden. Gewissheit hinsichtlich einer diesbezüglichen Unbedenklichkeit brachten Vergleichsproben mit einem anderen, baugleichen Fahrzeug, das mit fossilem Benzin betrieben wurde und ein ähnliches Verhalten zeigte, sowie direkte Versuche an bleihaltigen Materialien mit MTBE-angereichertem Motorenöl, die keinerlei Angriff an bleihaltigen Lagerschalen zeigten.

MTBE ist in niedrigen Konzentrationen ungiftig, hat aber einen terpenartigen Geruch. Mit dem Aufkommen von MTBE als Oktanverstärker gab es in den 2000er-Jahren die Befürchtung, dass MTBE im Falle von auslaufendem Benzin - beispielsweise bei Fahrzeugunfällen - in das Grund- und Trinkwasser gelangen und dieses ungeniessbar machen könnte. Die Befürchtungen haben sich nicht bewahrheitet. Heute ist MTBE im Trinkwasser kein Thema mehr.

Als Unterschied beim Betrieb eines Oldtimers mit biosynthetischem Benzin anstelle von fossilem Benzin bleibt eine leicht höhere Löslichkeit für Oel- und/oder Treibstoffablagerungen, ein minimal anderer, jedoch nicht unangenehm wirkender Geruch der Abgasemissionen und eine insgesamt deutlich reduzierte CO₂-Emission. Die Analyse des biosynthetischen Benzins hat nämlich ergeben, dass der Kohlenstoff zu fast 90% aus biogenen Quellen stammt.

2. Untersuchte Treibstoffe

2.1 Eingesetzte Treibstoffe

Für das vorliegende Projekt wurden folgende Treibstoffe eingesetzt (siehe Abbildung 1):

- a) Handelsübliches, fossiles 98-Oktan Referenzbenzin (Abbildung 1, Probe #10.2)
- b) Biosynthetisches 98-Oktan Vergleichsbenzin (Abbildung 1, Probe #10);
Lieferant: P1 Performance Fuels GmbH, Berlin (D)



Abbildung 1: Proben des klaren biosynthetischen Benzins (links) und des gelblichen fossilen Benzins (rechts)

Fossiles Benzin wird aus Erdöl hergestellt, das hauptsächlich aus Kohlenwasserstoffen besteht. Das Erdöl ist vor sehr langer Zeit durch Umwandlung organischer Stoffe entstanden. Um daraus Benzin herzustellen, wird das Erdöl in Raffinerien gereinigt, destilliert und weiter aufbereitet. Das Erdöl wird dabei erhitzt und in sogenannten Rektifikationskolonnen in mehreren Stufen kondensiert, wobei die Temperatur auf jeder Stufe absinkt. Das Kondensat wird abgefangen und kann je nach Siedetemperatur unterschiedlichen Produktgruppen (zum Beispiel Benzin, Kerosin, Diesel, Schweröl) zugeordnet werden. Die Kondensate wie auch Destillationsrückstände werden durch zusätzliche Verfahren weiter behandelt, bis die gewünschte Rohproduktqualität erreicht ist. Den Rohprodukten werden anschliessend zusätzliche Stoffe beigemischt, um beispielsweise die Kaltstarteigenschaften zu verbessern oder die Klopfneigung zu senken. Anschliessend werden Treibstoffe den geltenden Umweltschutzaufgaben angepasst. Beispielsweise entzieht man den Treibstoffen die unerwünschten Schwefelanteile.

Die Nutzung von fossilem Benzin führt zu einer Erhöhung der CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre, da der Kohlenstoffanteil des Benzins in klimawirksames Kohlendioxid (CO_2) umgewandelt und in die Atmosphäre ausgestossen wird.

Biosynthetisches Benzin wird typischerweise aus erneuerbarem Methanol hergestellt. Methanol ist ein einfacher Alkohol mit der Formel CH_3OH . Für dessen Herstellung wird mittels Vergasung von Holz (oder anderer trockener Biomasse) in einem ersten Schritt Wasserstoff (H_2), Kohlenmonoxid (CO) und Kohlendioxid (CO_2) erzeugt, die dann in einem katalytischen Syntheseverfahren in Methanol umgewandelt werden. Das erneuerbare Methanol wird anschliessend in einem weiteren Schritt, dem "Methanol-to-Gasoline-Verfahren", in ein benzinähnliches Produkt umgewandelt. Dabei wird das Methanol (CH_3OH) in Dimethylether und Wasser ($\text{CH}_3\text{OCH}_3 + \text{H}_2\text{O}$) zersetzt. Dimethylether und Methanol reagieren unter weiterer Wasserbildung zu leichten Olefinen (ungesättigte Kohlenwasserstoffe) wie Ethen (C_2H_4), Propen

(C₃H₆) und Buten (C₄H₈). Diese werden anschliessend in einem Oligomerisierungsverfahren in länger-kettige Kohlenwasserstoffe umgewandelt. Die Katalysatoren und die Reaktionsbedingungen müssen dabei so gewählt werden, dass schlussendlich ein benzinähnliches Gemisch aus Paraffinen (gesättigte Kohlenwasserstoffe), Zykoalkanen (ringförmig aufgebaute, gesättigte Kohlenwasserstoffe) und Aromaten (ringförmig aufgebaute, mehrfach ungesättigte Kohlenwasserstoffe) entsteht. Bei der Umwandlung von Methanol über Dimethylether in ein benzinähnliches Gemisch entsteht auch Methyl-tert-Butylether (MTBE), das als Antiklopffmittel auch dem fossilen Benzin (typischerweise allerdings aus fossil hergestelltem Methanol) beigemischt wird. Ein etwas erhöhter MTBE-Gehalt ist deshalb ein Charakteristikum von biosynthetischem Benzin. Dies ist auch der Grund, weshalb biosynthetisches Benzin systembedingt eine hohe Oktanzahl aufweist.

Die Nutzung von biosynthetischem Benzin führt im Vergleich zu fossilem Benzin zu einer deutlich geringeren Erhöhung der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre, weil die gleiche Menge CO₂, die bei der Nutzung von biosynthetischem Benzin entsteht, zuvor von der biogenen Quelle (z.B. Holz) während dem Wachstum via Photosynthese aus der Atmosphäre entnommen wurde. Lediglich die mit der Umwandlung von Biomasse in Methanol und in biosynthetisches Benzin verbundenen Emissionen führen zu einer Erhöhung der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre.

Für die beiden oben genannten Treibstoffe wurden bei der Intertek Schweiz AG Treibstoffanalysen nach den aktuellen Normen für Benzin "Bleifrei 98" Klasse A (SN EN 228:2012+A1:2017) in Auftrag gegeben. Die Ergebnisse werden nachstehend vorgestellt. Da Methanol auch aus fossilen Quellen hergestellt werden kann, was dann im Vergleich zu fossilem Benzin insgesamt nicht zu einer Reduktion der CO₂-Belastung führen würde, wurde beim biosynthetischen Benzin zusätzlich der nicht-fossile Kohlenstoffanteil bestimmt. Dies erfolgte mittels Messung des radioaktiven Isotops Kohlenstoff-14 (¹⁴C) nach dem Verfahren ASTM D6866-21. Als Isotope werden Varianten von chemischen Elementen (z.B. Kohlenstoff) bezeichnet, die im Atomkern zwar gleich viele Protonen, aber unterschiedliche viele Neutronen aufweisen. Neben zwei stabilen Isotopen beinhaltet Kohlenstoff auch das instabile, in natürlichen Prozessen der Photosynthese gebildete ¹⁴C-Isotop. Dieses weist eine Halbwertszeit von knapp 6'000 Jahren auf, weshalb es beispielsweise für die Altersbestimmung in der Archäologie analysiert wird.

Aufgrund des hohen Alters fossiler Energieträger ist das ursprünglich vorhandene ¹⁴C-Isotop in deren Kohlenstoff zerfallen, während dieses bei biogenem Kohlenstoff - der sehr viel jünger ist - in der Photosynthese laufend nachproduziert wird und deshalb noch vorhanden ist. Das bedeutet, dass der Anteil an jungem bzw. erneuerbarem Kohlenstoff anhand des ¹⁴C-Anteils identifiziert werden kann.

Bei erneuerbaren Treibstoffen wird unterschieden, ob diese den fossilen Treibstoffen in beliebigen Anteilen beigemischt werden können oder nicht. Ist dies der Fall, wird von sogenannten "Drop in"-Treibstoffen gesprochen. Diese müssen die von der Gesetzgebung festgelegten Spezifikationen der fossilen Treibstoffe einhalten und gelten dann für den Einsatz als gleichwertig wie fossile Treibstoffe. Für Drop in-Treibstoffe ist somit auch keine Freigabe durch den Fahrzeughersteller erforderlich. Im Falle des vorliegenden biosynthetischen Benzins handelt es sich um einen solchen Drop in-Treibstoff.

Die Hauptspezifikationen der beiden Treibstoffe sind in Tabelle 1 zusammengestellt:

Fossiles Referenzbenzin		Biosynthetisches Vergleichsbenzin	
ROZ	98.8 [-]	ROZ	97.7 [-]
MOZ	88.3 [-]	MOZ	87.2 [-]
Dichte (15°C)	749.4 [kg/m ³]	Dichte (15°C)	760.5 [kg/m ³]
Bleigehalt	<5 [mg/kg]	Bleigehalt	<5 [mg/kg]
Schwefelgehalt	4.8 [mg/kg]	Schwefelgehalt	<1 [mg/kg]
<i>HC-Gruppen</i>		<i>HC-Gruppen</i>	
Olefine	7.6 %(V/V)	Olefine	3.8 %(V/V)
Aromaten	31.1 %(V/V)	Aromaten	31.2 %(V/V)
Benzol	0.57 %(V/V)	Benzol	0.19 %(V/V)
Sauerstoff	2.0 %(m/m)	Sauerstoff	3.6 %(m/m)
Methanol	0.13 %(V/V)	Methanol	0.13 %(V/V)
Ethanol	0.17 %(V/V)	Ethanol	<0.01 %(V/V)
MTBE	6.64 %(V/V)	MTBE	17.96 %(V/V)
ETBE	4.41 %(V/V)	ETBE	1.86 %(V/V)
Summe Ether (nC>=5)	11.07 %(V/V)	Summe Ether (nC>=5)	19.84 %(V/V)
<i>Siedeanalyse</i>		<i>Siedeanalyse</i>	
Beginn (>0%)	34.6 °C	Beginn (>0%)	37.9 °C
10% verdampft	57.8 °C	10% verdampft bis	55 °C
20% verdampft	67.6 °C	20% verdampft bis	61.3 °C
50% verdampft	99.3 °C	50% verdampft bis	92.7 °C
90% verdampft	149.3 °C	90% verdampft bis	177.6 °C
Siedeende	189.3 °C	Siedeende	204.9 °C
bis 70° C verdampft	24.4 %(V/V)	bis 70° C verdampft	34.4 %(V/V)
bis 100° C verdampft	52.7 %(V/V)	bis 100° C verdampft	55.5 %(V/V)
bis 150° C verdampft	92.2 %(V/V)	bis 150° C verdampft	76.1 %(V/V)
<i>Elementaranalyse</i>		<i>Elementaranalyse</i>	
Kohlenstoff	84.8 %(m/m)	Kohlenstoff	84.1 %(m/m)
Wasserstoff	12.7 %(m/m)	Wasserstoff	11.7 %(m/m)
Summe (inkl. Sauerstoff O ₂)	99.5 %(m/m)	Summe (inkl. Sauerstoff O ₂)	99.4 %(m/m)
Heizwert (Hu)	42.23 MJ/kg	Heizwert (Hu)	41.74 MJ/kg
Anteil des nicht-fossilen Kohlenstoffs	- %	Anteil des nicht-fossilen Kohlenstoffs	87 %

Tabelle 1: Spezifikationen der verwendeten Benzinqualitäten
(V/V = Volumenkonzentration; m/m = Massenanteil)

Der Vergleich der Treibstoffanalysen zeigt lediglich beim Sauerstoff- und dem MTBE-Gehalt signifikante Unterschiede (grau unterlegt in Tabelle 1). Das biosynthetische Benzin weist bei Beidem deutlich höhere Werte auf als das fossile Referenzbenzin. Der rund doppelt so hohe Sauerstoffgehalt im biosynthetischen Benzin im Vergleich zum fossilen Referenzbenzin hängt mit dem höheren MTBE-Anteil zusammen, da MTBE eine sauerstoffhaltige Komponente ist. MTBE ist in niedrigen Konzentrationen ungiftig; aber es ist geruchsintensiv und wasserlöslich. In den 2000er-Jahren wurde deshalb vor allem in den USA befürchtet, dass MTBE aufgrund von Leckagen von Tankstellen und Fahrzeugen in das Grundwasser gelangen könnte und dieses aufgrund des terpenartigen Geruchs ungeniessbar machen könnte. Die Befürchtung hat sich jedoch nicht bewahrheitet¹. MTBE wird im Wasser zwar anfänglich nur langsam abgebaut, da die Bakterien, die solche Verunreinigungen abbauen, sich zuerst darauf adaptieren müssen. Heute ist MTBE im Trinkwasser kein Thema mehr.

Während das fossile Referenzbenzin alle Spezifikationen einhält, liegt die Research-Oktanzahl (ROZ) des biosynthetischen Vergleichsbenzins mit 97.7 Oktan bei dieser Einzelanalyse leicht unterhalb der Spezifikation (mind. 98.0 Oktan). Die Motor-Oktanzahl (MOZ) hält die Spezifikation jedoch ein. Die ROZ beschreibt das Klopfverhalten des Treibstoffs bei niedriger Motor- und niedriger Temperatur, während die MOZ das Klopfverhalten bei hoher Temperatur und hoher Drehzahl angibt. Die Abweichung der ROZ ist jedoch derart gering, dass im Betrieb keine mess- oder spürbare Beeinflussung erwartet werden kann. Dies insbesondere auch, weil die Motoren von Oldtimer typischerweise für Benzinqualitäten mit 91 oder 95 Oktan ausgelegt sind.

¹ Abklärung im Dezember 2022 mit Prof. Dr. Mario Schirmer, Abt. Abteilung Wasserressourcen & Trinkwasser der EAWAG

Für die korrekte Gemischbildung ist bei Fahrzeugen mit Motoren ohne Klopf- und/oder Lambdaregelung, wie dies bei klassischen Fahrzeugen oft der Fall ist, neben der Klopfbarkeit des Treibstoffs auch der volumetrische Heizwert von Bedeutung. Würde dieser Unterschiede zum fossilen Benzin aufweisen, müssten ggf. Anpassungen an der Vergaserbestückung oder der Kalibrierung der Einspritzanlage vorgenommen werden, was den Einsatz von biosynthetischem Benzin stark einschränken würde. Im vorliegenden Fall ist der volumetrische Heizwert beider Treibstoffe jedoch nahezu identisch, weshalb im Ansprech- oder Leistungsverhalten des Fahrzeugs keine Beeinflussung zu erwarten ist.

Neben der Zusammensetzung spielt im realen Betrieb auch das Siedeverhalten von Treibstoffen eine wichtige Rolle. Dieses beeinflusst die Gemisch-Aufbereitung, das Startverhalten sowie die Verbrennung selbst. Die Siedekurven der beiden Treibstoffe sind in Abbildung 2 dargestellt. Dabei ist sowohl der verdampfte Anteil der Treibstoffe bei einer bestimmten Temperatur als auch der Siedebeginn und das Siedende von Interesse.

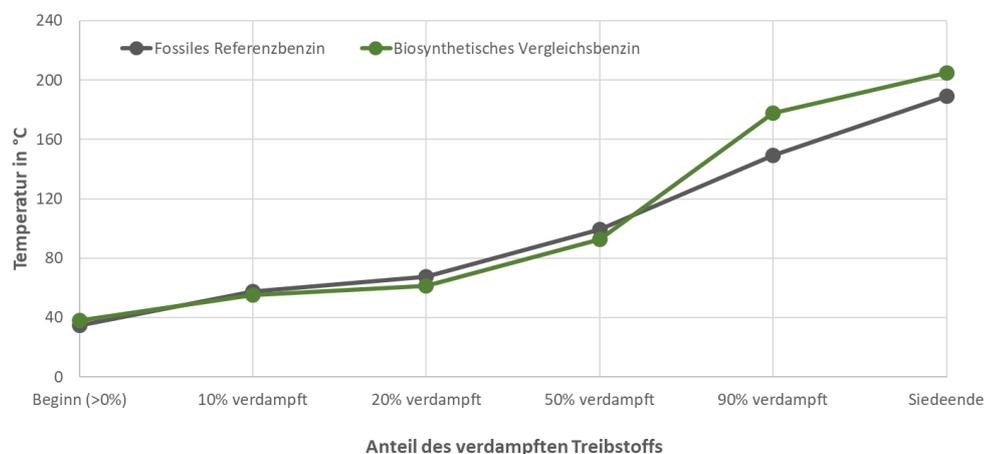


Abbildung 2: Siedeverlauf des fossilem Referenzbenzins (grau) und des biosynthetischen Vergleichsbenzins (grün)

Im Vergleich zeigen sowohl der fossile Referenztreibstoff wie auch das biosynthetische Benzin ein sehr ähnliches Verhalten. Bis 100°C sind beim biosynthetischen und beim fossilen Benzin praktisch gleich hohe Anteile verdampft. Dieser Bereich ist vor allem für das Startverhalten und die Gemischbildung im Vergaser von Bedeutung. Ab 100 °C bis zum Siedende bleibt der Anteil des verdampften biosynthetischen Benzins leicht unter demjenigen des fossilen Referenzbenzins. Die Unterschiede sind aber klein und liegen für beide Treibstoffe innerhalb der relevanten Spezifikation. Deshalb sind weder beim Startverhalten noch bei Betrieb bei höheren Treibstofftemperaturen spürbare Unterschiede zu erwarten.

Bemerkung:

Für die Anerkennung als "biogener Treibstoff" im Sinne des Mineralölsteuergesetzes, Art. 2, Abs. 3, Bst. d müssen neben der erneuerbaren energetischen Basis weitere ökologische und soziale Anforderungen eingehalten werden. Diese sind in der Mineralölsteuerverordnung, Art. 19 geregelt. Erneuerbare Treibstoffe, die diese Anforderungen einhalten, können teilweise oder ganz von der Mineralölsteuer befreit werden. Ob der hier genutzte biosynthetische Treibstoff diese Anforderungen einhält, war nicht Gegenstand der Untersuchungen.

3. Materialverträglichkeit

3.1 Prüfobjekte

Die Materialverträglichkeit wurde an charakteristischen, treibstoffführenden Bauteilen und Dichtungsmaterialien, wie sie in klassischen Fahrzeugen zum Einsatz kommen, durchgeführt. Diese wurden in Absprache mit AMAG Classic definiert und von dieser zur Verfügung gestellt. Zudem wurde die Verträglichkeit mit zwei Treibstoffadditiven untersucht, welche von der AMAG Classic zur Verfügung gestellt wurden. Solche Additive kommen in klassischen Fahrzeugen regelmässig zum Einsatz, um Ablagerungen bzw. Rückstände im Treibstoffsystem vorzubeugen, die sich aufgrund der oftmals langen Standzeiten bilden können. Schliesslich wurde auch die Verträglichkeit mit einem Bleiersatzmittel untersucht. Bleiersatzmittel werden unverbleiten Treibstoffen zugemischt, um die schmierende Wirkung des Bleis früherer Benzinqualitäten sicherzustellen. Früher wurde dem Benzin Blei in Form von Tetraethylblei beigemischt, das bei Fahrzeugmotoren ohne gehärtete Ventilsitze als Verschleisschutz diente. Zudem wirkte das Tetraethylblei als Antiklopfmittel.

Die Additive wurden dem biosynthetischen Benzin in dem vom jeweiligen Hersteller vorgeschriebenen Mischungsverhältnis sowie in einer deutlichen Überdosierung (5 und 50-fache Dosierung) beigemischt. Letzteres, um auch den Grenzfall einer falschen Handhabung abzubilden.

Tabelle 2 zeigt die untersuchten Bauteile.

Prüfobjekte	Untersuchung
Dichtung Vergaser	Tauchversuch fossil und biosynth. Benzin
Dichtung Tankgeber	Tauchversuch fossil und biosynth. Benzin
Vergaserschwimmer	Tauchversuch biosynth. Benzin
Kraftstofffilter (Kunststoff)	Tauchversuch biosynth. Benzin
Diverse Schläuche (Tanksystem)	Tauchversuch biosynth. Benzin
Vergaser / Benzinpumpe	Tauchversuch biosynth. Benzin
Tankgeber inkl. Schwimmer (3 Typen)	Tauchversuch biosynth. Benzin
Tank	Tauchversuch biosynth. Benzin
Vergaser / Benzinpumpe	Offenversuch fossil und biosynth. Benzin
Liqui Moly "Injection Reiniger"	4.2 ml/Liter und Überdosierung 1:5 im Testkraftstoff
Liqui Moly "MTX Vergaser Reiniger"	4.2 ml/Liter und Überdosierung 1:5 im Testkraftstoff
Motorex "Valve Guard"	1 ml/Liter und Überdosierung 5-fach im Testkraftstoff

Tabelle 2: Übersicht der hinsichtlich Materialverträglichkeit untersuchten Komponenten

3.2 Versuchsaufbau

Zur Untersuchung der Materialverträglichkeit wurde ein einfacher Versuchsaufbau erstellt, der es erlaubt, die Dichtungsmaterialien und Komponenten im Treibstoff sicher zu lagern und zu handhaben. Abbildung 3 zeigt den Versuchsaufbau der Proben. Auf den Bildern sind die Probeflaschen und Behälter für die Tauchversuche sowie der zusätzliche Offenversuch mit Treibstoffkanister, Benzinpumpe und Vergaser zu sehen. Dieser Offenversuch soll die generelle Anordnung im Fahrzeug abbilden und aufzeigen, ob eventuelle Lecks entstehen. Der Reservekanister wurde etwas höher positioniert um einen geringen Druck in den Komponenten zu erzeugen, damit bei einer Undichtheit der Treibstoff auch erkennbar auslaufen würde. Die untersuchten Komponenten waren keine Neuteile, was für ein Umstieg auf synthetischen Treibstoff auch im realen Anwendungsfall dem wahrscheinlichsten Szenario entspricht.



Abbildung 3: Versuchsaufbau für Materialverträglichkeitsuntersuchungen
(Fläschchen #3 beinhaltet bio-synthetisches Benzin und Fläschchen #3.2 bzw. #4.2 fossiles Benzin)

Basierend auf den Erkenntnissen der Treibstoffanalysen und der weitgehenden Übereinstimmung in der Zusammensetzung und den Eigenschaften der beiden Treibstoffqualitäten wurde für die Untersuchung der Materialverträglichkeit eine einfache Methode gewählt. Diese beinhaltet das Einlegen der Prüfobjekte im biosynthetischen Vergleichs- und/oder im fossilen Referenzbenzin. Die Dichtungsmaterialien wurden in beiden Treibstoffen eingelegt, die anderen Prüfobjekte nur im biosynthetischen Vergleichsbenzin.

Insgesamt wurden die Prüfobjekte über einen Zeitraum von 12 Monaten im jeweiligen Treibstoff eingelegt. Diese wurden dem Treibstoff in regelmässigen Abständen für eine 24 stündige Abluftzeit entnommen, vermessen und gewogen. Dies erfolgte jeweils zu Beginn und am Ende der Beobachtungsperiode sowie zwei Mal zwischendurch. Damit sollten allfällige Formänderungen durch Quellen oder Schrumpfen, Auflöse- oder Korrosionseffekte erfasst werden.

3.3 Ergebnisse der Materialverträglichkeitsuntersuchungen

Generell kann festgehalten werden, dass im Beobachtungszeitraum von 12 Monaten nur minimale Veränderungen an den Prüfobjekten beobachtet wurden. Nachfolgend werden die Ergebnisse der unterschiedlichen Komponentengruppen näher beschrieben.

a) Dichtungen Vergaser, Tankgeber

Die untersuchten Vergaserdichtungen bestehen aus imprägniertem Dichtungsmaterial auf der Basis von leimgebundenen Zellulosefasern (Dichtungspapier). Die Tankgeber-Gummidichtungen bestehen aus öl- und treibstoffbeständigen Elastomer-Materialien. Bei Dichtungsmaterialien muss auch im Kontakt mit fossilem Benzin ein gewisses Quellverhalten erwartet werden. Deshalb wurden diese Materialien sowohl im fossilen Referenzbenzin, wie auch im biosynthetischen Vergleichsbenzin eingelegt und die Veränderungen festgehalten. Für Zellulose-basierte Dichtungsmaterialien wird von den Herstellern eine Dickenzunahme in Öl bzw. Benzin bis 5% bzw. eine Zunahme der Masse von 15 - 20% als normal angegeben. Diese Quellung ist unproblematisch. Das gleiche gilt auch für Elastomer-Dichtungen im statischen Dichtfall (keine Abdichtung gegen bewegte Teile). Die Quellungen bilden sich in der Regel zurück, sobald die löslich wirkenden Benzin- oder Ölbestandteile, die vom Dichtungsmaterial aufgenommen werden, wieder abgedampft sind. Bei Elastomer-Dichtungen verbleibt jedoch oftmals ein Teil der Treibstoff- oder Öl-Bestandteile im Material zurück.

Eine übermäßige Quellung bei Gummidichtungen kann die Elastomer-Matrix schädigen und die Festigkeit beeinflussen. Wenn Lösemittel die Weichmacher eines Elastomer-Werkstoffs rausgelöst haben, ist in besonderen Fällen auch eine Schrumpfung möglich. Damit ändern sich natürlich die Eigenschaften des Werkstoffs und die Dichtfunktion kann unter Umständen nicht mehr erfüllt werden. Anhand der Messungen von Durchmesser/Länge und Dicke der Dichtungen sowie des Gewichtes können allfällige Veränderungen des Materials im Kontakt mit dem Testtreibstoff erfasst werden.

Die Ergebnisse zeigen, dass die oben beschriebene Einlagerung im biosynthetischen Benzin im Vergleich zur Einlagerung im fossilen Benzin zu keinen nennenswerten Unterschieden in den Abmessungen und der Masse geführt hat. Somit sind beim Einsatz des biosynthetischen Benzins keine Funktionseinschränkungen der untersuchten Dichtungen zu erwarten.

b) Kunststoffteile (Vergaserschwimmer, Benzinflter, Tankdeckel)

Viele Komponenten wie Tankdeckel, Vergaserschwimmer, Benzinfltergehäuse des Treibstoffsystems von vor allem jüngeren klassischen Fahrzeuge bestehen aus Kunststoff. Bei Kunststoffbauteilen ist es möglich, dass sie oberflächlich oder ganz durch Benzinbestandteile aufgeweicht werden und dadurch ihre Festigkeit, Form oder Funktionstüchtigkeit verlieren.



Abbildung 4: Hinsichtlich Treibstoffverträglichkeit untersuchte Kunststoffteile

Bei den untersuchten Bauteilen wurden im beobachteten Zeitraum keinerlei haptisch oder optisch erfassbaren Veränderungen verzeichnet, sodass deren Kontakt mit dem Testtreibstoff als unproblematisch bewertet wurde.

c) Treibstoffschläuche

Treibstoffschläuche sind auf der Innenseite permanent mit Treibstoff im Kontakt und bestehen meist komplett aus treibstoffbeständigen Materialien. Bei den Untersuchungen wurde bei einem der Schläuche eine leichte Verformung der äusseren Schicht beobachtet. Dieser Schlauch wird im Bereich des Tankstutzens genutzt. Er besteht aus einem inneren, treibstoffführenden Teil und einer äusseren Schicht, die im realen Betrieb nicht im Kontakt mit Treibstoff steht. Über den Aufbau des Schlauchs liegen keine Informationen vor; man kann aber davon auszugehen, dass dieser Schlauch nur auf der Innenseite aus treibstoffbeständigem Material besteht.

Alle anderen Schlauchproben zeigten keine Auffälligkeiten. Allerdings wurde eine leichte Verdunkelung des biosynthetischen Treibstoffs im Vergleich zum fossilen Benzin festgestellt (Abbildung 5). Diese ist vermutlich auf den zwar gereinigten, aber gebrauchten Anlieferungszustand der Schläuche zurückzuführen.



Abbildung 5: Schlauchproben ohne (links) und mit Verfärbung des biosynthetischen Benzins (rechts)

d) Tankgeber, Treibstoffpumpe, Vergaser sowie Offenversuch Vergaser, Tank

Eine Benzinpumpe, ein Vergaser und diverse Tankgeber wurden in das biosynthetische Benzin eingelegt (Abbildung 6 und Abbildung 7). Parallel dazu wurden eine Benzinpumpe und ein Vergaser mit Benzinschläuchen miteinander verbunden, um die Anordnung und Benetzung mit Treibstoff der Einbausituation im Fahrzeug nachzustellen. Beim im Treibstoff eingelegten Tankgeber wurde regelmässig überprüft, ob die Funktion der Kunststoffschwimmer erhalten bleibt.

An den dem biosynthetischen Benzin ausgesetzten Bauteilen wurden keine Änderungen festgestellt. Auch hier wurde nach einer gewissen Zeit eine leichte Verfärbung des bio-synthetischen Treibstoffs beobachtet (Abbildung 6). Auch diese Teile wurden gereinigt aber gebraucht angeliefert. Wie weiter oben gezeigt wurde, weist das bio-synthetische Benzin einen höheren Anteil an MTBE auf, das aufgrund seiner molekularen Struktur eine etwas höhere Löslichkeit aufweist als fossiles Benzin. Die beobachtete Verfärbung wird darauf zurückgeführt und passt somit ins Bild der erwarteten Auswirkungen des bio-synthetischen Benzins, auch wenn der Effekt sehr klein war. Bei der abschliessenden Untersuchung an den Teilen konnten keine Ablöseerscheinungen, Beschädigungen, Korrosionspuren oder sonstige Beeinflussungen am Material festgestellt werden.



Abbildung 6: Untersuchung Tankgeber, Benzinpumpe und Vergaser im Tauchversuch (links und Mitte) sowie nach Abschluss der Untersuchung

Ähnliche Ergebnisse wurden im Offenversuch des Vergasers und der Benzinpumpe erzielt. Im beobachteten Zeitraum ergaben sich keine Leckagen. Die im biosynthetischen Benzin eingelegten Vergaser und Benzin-Pumpen zeigten analog zu den Tankgebern keine besonderen Beschädigungen oder Korrosion, es wurde aber ebenfalls hier eine leichte Verfärbung des biosynthetischen Benzins beobachtet, siehe Abbildung 7.



Abbildung 7: Vergaser/Benzinpumpe

Neben den o.g. kleineren Bauteilen der Benzinversorgung wurde schliesslich noch ein Benzintank, der – wie bei klassischen Fahrzeugen üblich - aus Stahlblech besteht, mit dem biosynthetischen Benzin teilbefüllt. Dieser zeigte ebenfalls nach Abschluss der 12-monatigen Beobachtungszeit keine Korrosionserscheinungen oder andere sichtbare Veränderungen an den Innenwänden.

e) Langzeitstabilität der Treibstoffadditive

Im hier betrachteten Zeitraum von zirka 12 Monaten wurde weder eine Entmischung noch Ausscheidungen noch eine Verfärbung der Proben gegenüber dem Anfangszustand beobachtet. Es kann somit davon ausgegangen werden, dass diese Treibstoffadditive beim Einsatz mit dem biosynthetischen Benzin weiterhin verwendet werden können.

4. Untersuchung der Abgasemissionen

4.1 Testfahrzeug und Versuchsaufbau

Als Testfahrzeug für die Abgasuntersuchungen diente ein Pool-Fahrzeug der Empa. Es handelte sich um einen VW Jetta Hybrid (Abbildung 8). Das Fahrzeug weist ein wesentlich moderneres Antriebskonzept mit 3-Wege-Katalysator und elektronischer Motorsteuerung auf, als dies typischerweise bei klassischen Fahrzeugen der Fall ist. Für vergleichende Abgasuntersuchungen ist jedoch ein stabiles Emissionsverhalten wichtig, was mit dem vorliegenden Fahrzeug gewährleistet werden konnte.



Abbildung 8: Testfahrzeug für Abgasuntersuchungen

Der Benzintank wurde vor den Messungen leergespült und mit dem jeweiligen Testtreibstoff befüllt. Vor den Messungen wurde das Fahrzeug einige Kilometer in verschiedenen Last- und Drehzahlbändern auf dem Rollenprüfstand gefahren.

Die Messungen wurden auf einem 1-Achs-Rollenprüfstand der Empa durchgeführt. Das Setup der Abgasanalytik ist in Abbildung 9 dargestellt.

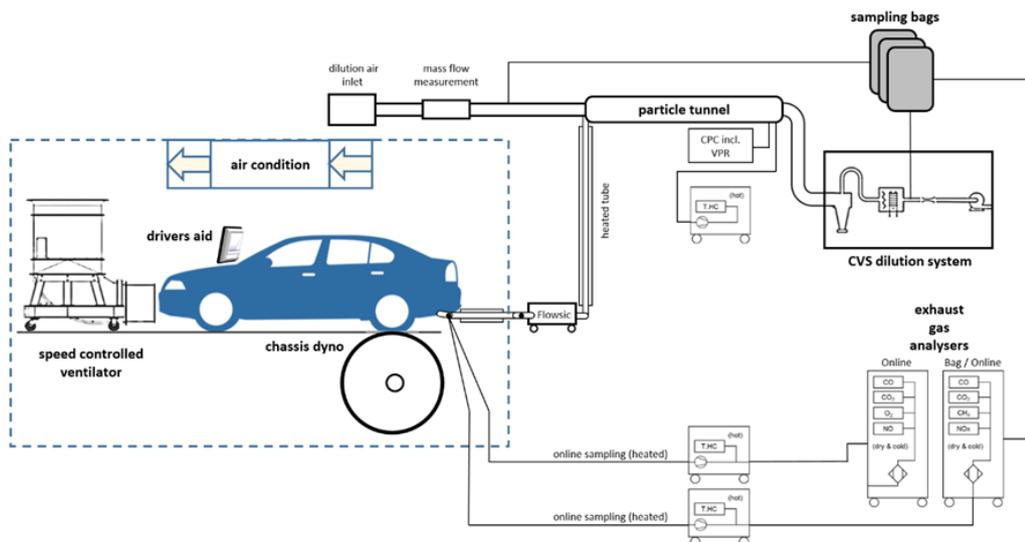


Abbildung 9: Fahrzeugaufbau auf Rollenprüfstand für Abgasuntersuchungen

Das Abgasverhalten wurde pro Treibstoff in drei aufeinanderfolgenden WLTP-Messungen (WLTP = World-wide Harmonized Light Duty Test Procedure) ermittelt. Jede Messung beinhaltet 3 Phasen. Um Streuungen der Resultate im Kaltstart zu vermeiden wurden die Messungen mit betriebswarmem Motor gestartet (Motoröltemperatur >80°C).

4.2 Ergebnisse

Die folgenden Diagramme zeigen die Mittelwerte aus den drei WLTP-Abgasmessungen. Die Streubalken zeigen den höchsten und kleinsten gemessenen Wert. Rot stellt die Resultate mit fossilem Referenzbenzin, blau die Resultate mit biosynthetischem Benzin dar.

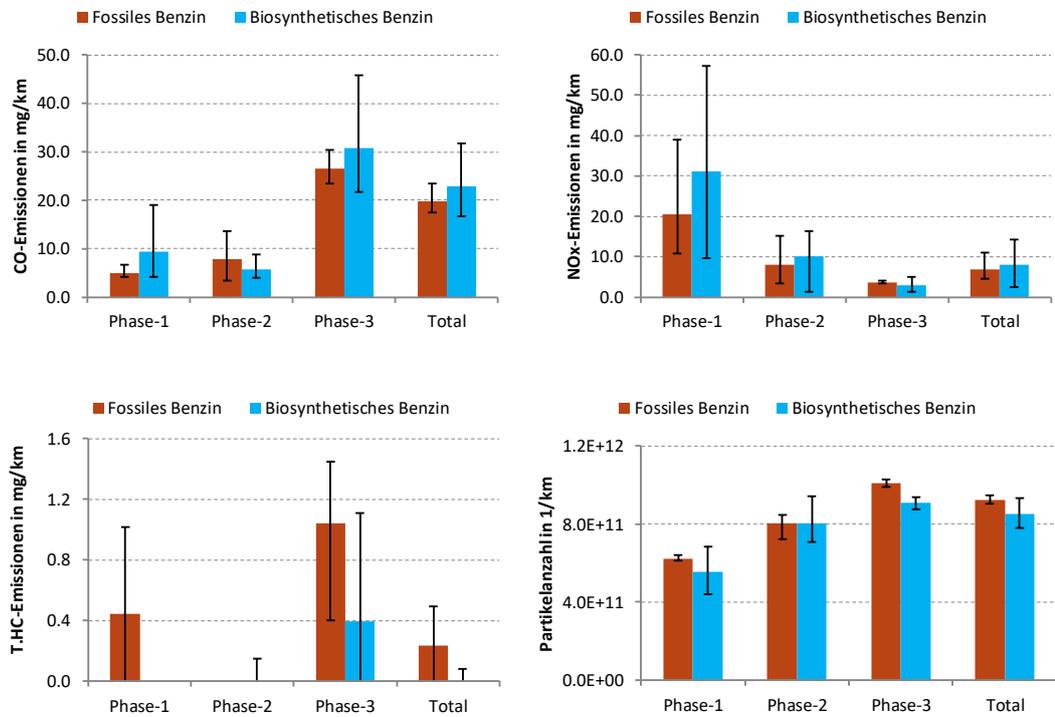


Abbildung 10 Ergebnisse der WLTP-Abgasmessungen mit betriebswarmem Motor

Die Messwerte liegen bei allen Messungen auf sehr niedrigem Niveau. Die Abgasemissionen mit biosynthetischem Benzin unterscheiden sich nicht signifikant von denen mit dem fossilen Referenzbenzin. Bei den Partikelemissionen ergibt sich in der Phase 3 (Autobahnfahrt) ein leichter Trend in Richtung geringerer Emissionen. Dies könnte auf den höheren Sauerstoffanteil des biosynthetischen Treibstoffes zurückgeführt werden. Die Unterschiede sind jedoch gering.

Gleichzeitig mit den Abgasemissionen wird auch der Treibstoffverbrauch bestimmt.

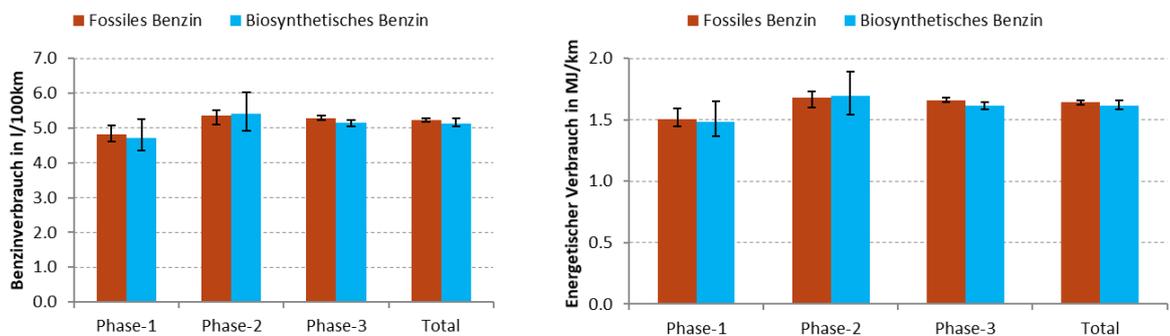


Abbildung 11: Ergebnisse der WLTP-Verbrauchsmessungen mit betriebswarmem Motor

Wie bei den Abgasemissionen zeigen auch die Ergebnisse mit beiden Treibstoffen sowohl beim volumetrischen Benzinverbrauch wie auch beim energetischen Verbrauch keine messbaren Unterschiede.

5. Radleistungsmessung

5.1 Testfahrzeug und Versuchsaufbau

Als Testfahrzeug für die Radleistungsmessungen diente ein Veteranenfahrzeug der AMAG Classic. Es handelte sich um einen VW Golf I gemäss Abbildung 12.



Testfahrzeug für Leistungsmessungen	
Marke:	Volkswagen
Modelbezeichnung:	Golf
VIN:	178 342 861 0
Hubraum:	1457 cm ³
Leistung:	52 kW
Drehmoment:	250 Nm
1. Inverkehrsetzung:	16.05.1978
Motorcode:	JB
Abgasgenehmigung:	74/290 EWG
TG-Nr. CH:	0852 92
ECU Typ:	- - -

Abbildung 12: Testfahrzeug für Leistungsmessungen

Der Treibstofftank wurde vor den Messungen leergepumpt und mit den jeweiligen Prüftreibstoffen befüllt.

Das Fahrzeug wurde auf dem Rollenprüfstand mit beiden Treibstoffen einer statischen sowie einer dynamischen Leistungsmessung unterzogen.

Für die statische Radleistungsmessung wurde der Rollenprüfstand auf eine konstante Geschwindigkeit von 50 km/h eingestellt und das Fahrzeug für 15 Sekunden im dritten Gang mit Volllast beaufschlagt. Dabei wurde die Radleistung als Mittelwert zwischen Sekunde 2 bis 14 definiert. Die Geschwindigkeit von 50 km/h wurde gewählt, weil die Beschleunigung ab 50 km/h einer im Schweizer Alltag gängigen Fahrsituation entspricht.

Für die dynamische Radleistungsmessung wurde der Rollenteststand auf einen Fahrwiderstand eingestellt, welcher höher ist als der Strassenfahrwiderstand des Fahrzeuges. Das hat zur Folge, dass der Beschleunigungsgradient flacher ausfällt als er dies auf der Strasse tun würde, was für den Versuch Vorteile in der Messgenauigkeit bietet. Erstens hat man aufgrund des trägeren Beschleunigungsverhaltens mehr Messpunkte pro Zeiteinheit zur Verfügung und zweitens entspricht die Füllung des Motors eher jener einer konstanten Belastung. Das Fahrzeug wurde zur Bestimmung der Radleistung 3 Mal hintereinander im dritten Gang ab 40 km/h mit Vollgas beschleunigt bis eine Drehzahl von 6'000 U/min erreicht wurde. Dabei wurde die Zugkraft gemessen und gemittelt. Der dritte Gang wurde gewählt, um das Fahrzeug nicht unnötig hohen Geschwindigkeiten auszusetzen, wie dies im vierten Gang der Fall gewesen wäre.

5.2 Ergebnisse der statischen Radleistungsmessung

Das Fahrzeug erreichte mit beiden Treibstoffen annähernd die gleiche statische Radleistung (Abbildung 13). Der Mittelwert über die 3 Messungen während der jeweils 12 Sekunden dauernden Messung beträgt beim biosynthetischen Benzin 20.9 kW und beim fossilen Referenzbenzin 21.1 kW. Die Abweichung liegt somit bei 1%, was innerhalb der Messgenauigkeit liegt.

Abbildung 5 zeigt in Rot die Radleistungsmessung mit dem fossilen Referenzbenzin und in blau die Radleistungsmessung mit biosynthetischem Benzin. Die Punkte entsprechen dem Mittelwert aus den drei aufeinanderfolgenden Messungen, die rote und blaue Linie ist der gleitende Mittelwert.

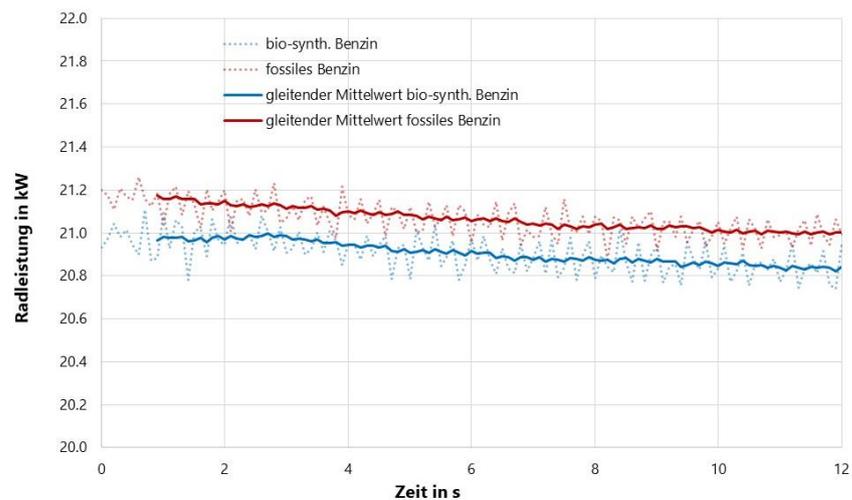


Abbildung 13: Ergebnisse der statischen Radleistungsmessungen

5.3 Ergebnisse der dynamischen Radleistungsmessung

Die dynamische Radleistungsmessung (Abbildung 14) zeigt keinerlei Unterschiede zwischen den beiden Treibstoffen, die gemessene Maximalleistung, gemittelt aus den drei Beschleunigungen, beträgt in beiden Fällen exakt 40,9 kW. Abbildung 14 zeigt alle sechs dynamischen Leistungsmessungen (3 je Treibstoff).

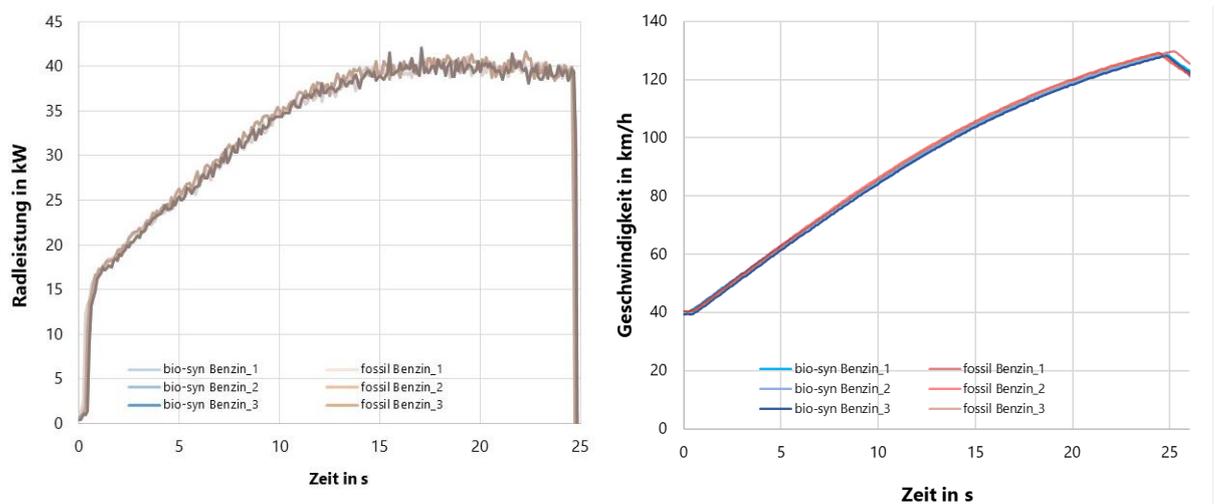


Abbildung 14: Ergebnisse der dynamischen Radleistungsmessungen (links) und der Vollast-Beschleunigung (rechts)

Bei diesen Messungen handelt es sich nicht um reglementierte Leistungsmessungen, sondern um Vergleichsmessungen unter definierten Bedingungen. Unter Berücksichtigung der Verluste im Antriebsstrang und der nötigen Korrekturen von Luftdruck und Temperatur, wie sie bei Motorleistungsmessungen vorgenommen werden, entsprechen die gemessenen Werte trotzdem ziemlich genau der deklarierten Motorleistung dieses Fahrzeugs von 70 PS bzw. 51 kW.

6. Fahrversuche

6.1 Versuchsfahrzeuge

Für die Fahrversuche wurden zwei Veteranenfahrzeuge aus dem Fuhrpark der AMAG Classic ausgewählt (Abbildung 15). Es handelt sich dabei um einen Chrysler Valiant mit 3.7 Liter 6-Zylindermotor mit Grauguss-Zylinderkopf, Grauguss-Motorblock und Erstinverkehrsetzung im Jahr 1971 (links) sowie um einen VW Golf mit 1.5 Liter 4-Zylindermotor mit Aluminium-Zylinderkopf, Grauguss-Motorblock und Erstinverkehrsetzung im Jahr 1978.



Abbildung 15 Versuchsfahrzeuge für die Fahrversuche

Die Fahrversuche starteten mit dem Betanken der beiden Fahrzeuge mit dem biosynthetischen Benzin. Danach folgten Erprobungsfahrten während insgesamt 7 Monaten (Frühling bis Herbst 2023). Die Fahrten bestanden bei beiden Fahrzeugen aus einem gemischten Betrieb mit bis zu 150 km Autobahnfahrten, Kurzstrecken von 500 m bis 15 km und ebenfalls längeren Standzeiten, wie dies bei Oldtimerfahrzeugen üblich ist. Dabei wurden auch Fahrten im Alpenraum durchgeführt; mit dem Chrysler Valiant beispielsweise im Engadin und über den Flüelapass.

Als Fahrer im Einsatz waren Mitarbeitende der AMAG Classic, welche die Test-Fahrzeuge gut kennen und deshalb in der Lage waren, die subjektiven Fahreindrücke im Vergleich zum fossilen Referenzbenzin richtig einzuordnen. Da die beiden Fahrzeuge bereits längere Zeit im Bestand der AMAG Classic sind und das Fahrverhalten gut bekannt war, konnte eine zuverlässige Einschätzung abgegeben werden. Bei beiden Fahrzeugen waren verschiedene Fahrer und Fahrerinnen im Einsatz.

Für die Fahrversuche mit biosynthetischem Benzin wurden keine Änderungen an Motor oder Fahrzeug vorgenommen mit Ausnahme des Wechsels auf ein Referenz-Motorenöl (Motorex Topaz 20W-50). Dazu wurde das Motorenöl (inklusive Oelfilter) zwei Mal gewechselt; mit kurzem Betrieb dazwischen. Beim Start der Fahrversuche wurde beiden Fahrzeugen eine erste Probe des Motorenöls entnommen.

Während der Versuchsphase wurden beim Start der Fahrversuche und anschliessend nach einer Fahrstrecke von jeweils ca. 1'000 - 1'500 km folgende Punkte überprüft:

- Ölqualität
- Messung der Kohlenmonoxid-Konzentration der Abgase im Leerlauf und bei 3'000 U/min
- Kontrolle des Zündkerzenbildes

6.2 Ergebnisse der Fahrversuche

a) *Fahrversuche*

Mit dem VW Golf wurden insgesamt 3'369 km und mit dem Chrysler Valiant 2'862 km zurückgelegt. Diese Fahrleistungen entsprechen in etwa der jährlich erlaubten Fahrleistung von Fahrzeugen mit Veteraneneintrag im Fahrzeugausweis (Code 180). Der Zeitraum der Fahrversuche zwischen Frühling und Herbst entspricht ebenfalls deren typischem Einsatzzeitraum.

Folgende Beobachtungen und Eindrücke wurden von den Fahrern und Fahrerinnen gemacht:

- Mit dem VW Golf wurden insgesamt 297.5 Liter an biosynthetischem Benzin verbraucht. Dies entspricht einem durchschnittlichen Verbrauch von 8.8 Liter auf 100 Kilometer.
- Mit dem Chrysler Valiant wurden 443 Liter an biosynthetischem Benzin verbraucht, was einem durchschnittlichen Verbrauch von 15.5 Liter auf 100 Kilometer entspricht.
- Die Fahrversuche mit bio-synthetischem Benzin zeigten bei beiden Fahrzeugen keinerlei spürbare Unterschiede im Vergleich zum Betrieb mit fossilem Benzin. Namentlich zeigten sich das Kaltstart- und Warmlaufverhalten, die Gasannahme, die Konstantfahrt im mittleren Drehzahlbereich, die verfügbare Leistung und der Verbrauch mit dem Testtreibstoff unverändert.
- Im Vergleich mit fossilem Benzin wurde bei beiden Fahrzeugen ein leicht anderer Geruch der Abgase festgestellt, der jedoch nicht als störend empfunden wurde. Eine entsprechende Untersuchung der Geruchsbildung wurde nicht durchgeführt, da dies den Rahmen des Vorhabens gesprengt hätte. Man kann aber davon ausgehen, dass sich die leicht unterschiedliche Benzinzusammensetzung beziehungsweise der leicht höhere Gehalt an MTBE auch in den unverbrannten Kohlenwasserstoffen spiegelt.
- Die Kohlenmonoxid-Messungen im Leerlauf sowie auch die Begutachtung des Zündkerzenbildes zeigten ebenfalls keine Auffälligkeiten.

b) *Oelanalysen*

Das Motorenöl weist neben der Schmierung auch weitere wichtige Funktionen wie die Reinigung von Oberflächen oder die Kühlung und Abdichtung von Bauteilen auf. Eine Beeinflussung des Motorenöls durch neuartige Treibstoffe könnte diese Funktionen beeinflussen, was für die Lebensdauer von Motoren von entscheidender Bedeutung sein könnte.

Um abzuklären, ob durch den Wechsel von fossilem auf biosynthetisches Benzin eine Beeinflussung des Motorenöls stattfindet, wurden während den Fahrversuchen bei beiden Fahrzeugen insgesamt drei Oelproben entnommen; eine Erste nach 40 km, eine Zweite nach rund 1'500 km und eine Dritte nach rund 3'000 km. Diese wurden im Oellabor von Motorex hinsichtlich physikalischer Eigenschaften wie Dichte, Viskosität (Zähflüssigkeit), Siedeverhalten/Flammpunkte, Oxidation mittels IR, Verschleiss-elemente sowie chemischer Eigenschaften wie Total Base Number (TBN) oder Total Acid Number (TAN), die die Säureaufnahmefähigkeit des Motorenöls und damit den Alterungszustand des Motorenöls charakterisieren, untersucht. Zudem wurden eine ganze Reihe an Oel-eigenen und Oel-fremden Substanzen analysiert, um aussagekräftige Interpretationen zur Oelqualität und der Motorschmierung der beiden Testfahrzeuge machen zu können. Die Ergebnisse wurden jeweils mit dem eingefüllten Frischöl verglichen.

Zusammengefasst haben sich dabei folgende prozentualen Veränderungen ergeben, wobei das Frischöl mit 100% abgebildet ist (Abbildung 16):

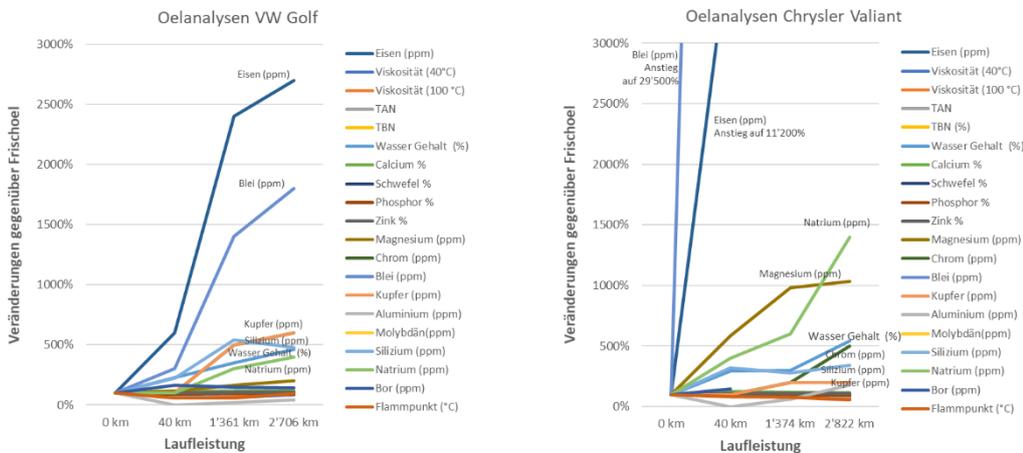


Abbildung 16: Ergebnisse der Oelanalysen des VW Golf (links) und des Chrysler Valiant (rechts); für Eisen- und Bleianteile siehe auch Abbildung 18

Die Oelanalysen ergaben ein insgesamt unkritisches Verhalten. Lediglich die Viskositätsabnahme bei beiden Fahrzeugen und die stark angestiegenen Eisen- und Bleiwerte beim Chrysler Valiant wurden einer weitergehenden Interpretation beziehungsweise Analyse unterzogen, um sicherzustellen, dass kein Effekt übersehen wurde.

■ *Viskosität des Motorenöls*

Bei beiden Fahrzeugen zeigte sich ein Viskositätsabfall beziehungsweise eine Abnahme der Zähflüssigkeit (Abbildung 17). Nimmt die Viskosität zu stark ab, kann ein ausreichender Schmierfilm möglicherweise nicht mehr überall sichergestellt werden.

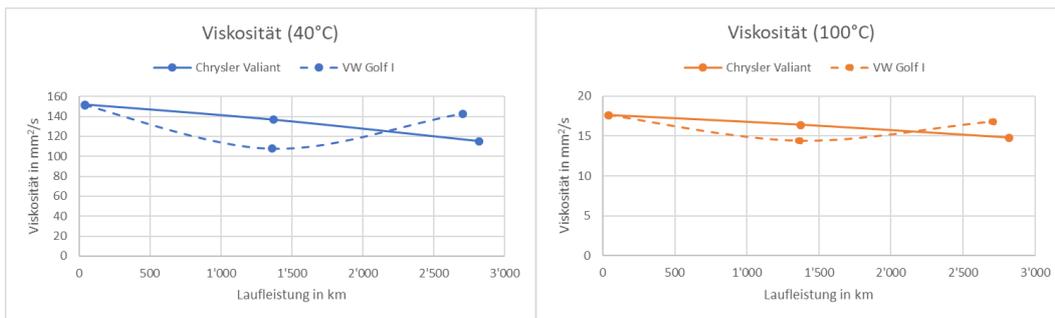


Abbildung 17 Viskositätsverlauf des Motorenöls über der Laufleistung

Der Viskositätsabfall kann mit der Verdünnung des Motorenöls durch Benzin erklärt werden, das über Blowby-Gase (Strömung von unverbranntem Treibstoff/Luft-Gemisch vom Brennraum über die Kolbenringe in das Kurbelgehäuse) in das Motorenöl gelangt. Aufgrund fehlender Vergleiche der Fahrzeuge im Betrieb mit fossilem Benzin liegt keine direkte Vergleichsgröße vor; es kann aber festgehalten werden, dass eine Viskositätsabnahme durch Benzinverdünnung bei klassischen Fahrzeugen in diesem Umfang normal ist und als unkritisch eingestuft werden kann. Passend dazu sind die Flammpunkte von über 200°C beim Frischöl bei beiden Fahrzeugen auf rund 115°C gefallen; beim Chrysler Valiant kontinuierlich und beim VW Golf bis zur zweiten Probe in der Mitte der Fahrdistanz.

Bei der letzten Probe lag der Flammpunkt beim Motorenöl des VW Golf mit 198°C praktisch wieder auf einem gleichen Wert wie beim Frischöl. Dies kann auf eine längere Fahrt bei höherer Last (z.B. Autobahnfahrt) zurückgeführt werden, bei der das Benzin im Motorenöl wieder verdampft ist.

Die Benzinverdünnung des Motorenöls ist bei klassischen Fahrzeugen aufgrund der geringeren Dichtheit des Brennraums zum Kurbelgehäuse oder der Qualität der Gemischbildung insbesondere beim Kaltstart beziehungsweise während dem Warmlauf systembedingt deutlich höher als bei modernen Fahrzeugen. Aus diesem Grund sind bei älteren Fahrzeugen im Vergleich zu modernen Fahrzeugen nur vergleichsweise hochviskose Motorenöle (z.B. 20W-50) freigegeben. Da sich - mit Ausnahme eines erhöhten MTBE-Anteils - weder beim Siedeverhalten noch bei der Zusammensetzung des biosynthetischen Benzins signifikante Unterschiede zum fossilen Benzin zeigen, kann davon ausgegangen werden, dass ein Wechsel von fossilem auf biosynthetisches Benzin hinsichtlich Benzinverdünnung des Motorenöls beziehungsweise der Viskosität nicht zu Unterschieden führt.

■ Eisen- und Bleianteile

Eine höhere Aufmerksamkeit verursachte der beim Chrysler Valiant stark angestiegene Eisen- und Bleianteil im Motorenöl. Während diese beim VW Golf nur von 1 ppm auf 27 ppm (Eisen) beziehungsweise von 1 ppm auf 18 ppm (Blei) anstieg, was in beiden Fällen einem unkritischen Verlauf entspricht, stiegen die Werte beim Chrysler Valiant von 1 ppm auf 112 ppm (Eisen) bzw. von 1 ppm auf rund 300 ppm (Blei) an, was als hoch einzustufen ist (Abbildung 18). Als unkritisch gelten Werte unterhalb von 100 ppm.

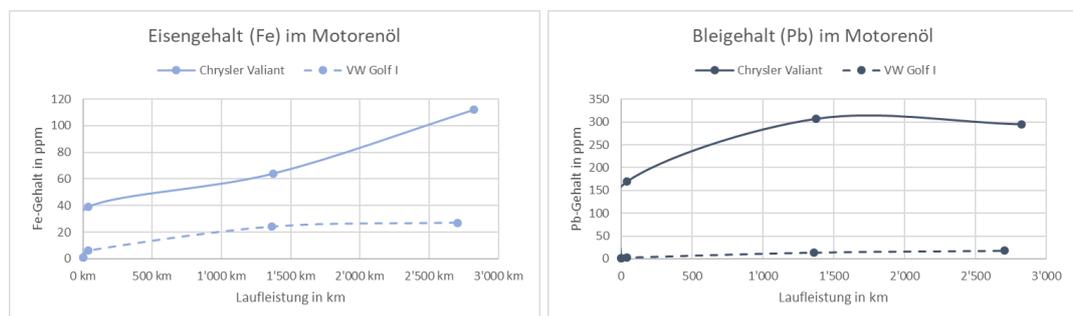


Abbildung 18: Eisen- und Bleianteile im Motorenöl in Abhängigkeit der Laufleistung

Als Ursache für den Anstieg des Eisens im Motorenöl des Chrysler Valiant wird ein mechanischer Abrieb vermutet. Da die Werte bereits während den ersten 40 km (erste Oelanalyse) stark angestiegen sind, wird nicht von einem durch den Treibstoffwechsel ausgelösten Effekt ausgegangen, sondern von einem bereits zuvor bestehenden Abrieb. Der starke Anstieg während den ersten 40 km lässt auf ein entsprechendes Depot beispielsweise im Oelsumpf oder in Oelkanälen schließen. Nach 40 km stiegen die Werte über der Laufleistung weiter an, was auf einen kontinuierlichen Eintrag durch Abrieb schließen lässt. Die Werte des VW Golf lagen während der ganzen Betriebszeit auf wesentlich niedrigerem Niveau.

Der Bleigehalt im Motorenöl des Chrysler Valiant stieg ebenfalls bereits in den ersten 40 km stark an, was eine durch den Treibstoffwechsel verursachte Schädigung von Lagern eigentlich ausschließt. Eine solche Schädigung bräuchte mit Sicherheit länger und würde voraussichtlich zu einer progressiven Erhöhung der Werte führen und nicht zu einem degressiven Verlauf, wie hier festgestellt. Da eine potentielle Schädigung bleihaltiger Lager im Motor den Einsatz des biosynthetischen Benzins für klassische Fahrzeuge enorm einschränken würde, wurden zusätzliche Untersuchungen durchgeführt.

a) Analyse der Feststoffe im Motorenöl

Bei Eisen- und Bleianteilen im Motorenöl ist entscheidend, ob es sich um Feststoffe oder um im Motorenöl gelöste Verbindungen handelt. Feststoffe könnten den Motor durch einen zusätzlichen Abrieb schädigen, während der Einfluss gelöster Verbindungen im Motorenöl gering ist. Zur Ermittlung des Zustands der Eisen- und Bleianteile wurden die Feststoffe der zweiten und dritten Oelprobe des Chrysler Valiant durch Motorex ausgefiltert und an der Empa mittels Rasterelektronenmikroskopie (REM) sowie energiedispersiver Röntgenspektroskopie (EDX) weiter untersucht. Dabei wurde auf beiden Proben eine Vielzahl an Partikelrückständen gefunden, welche in Form (eckig, scharfkantig) und Grösse (Partikel >5 µm) recht vergleichbar sind. Diese Rückstände bestehen gemäss EDX-Analyse zu grossen Anteilen aus Eisen, vereinzelt auch Zinn und Zink sowie organischen Bestandteilen. Die Verteilung war auf beiden Filtern relativ homogen. Aufgrund der scharfkantigen Form muss beim Eisen auf einen mechanischen Abrieb geschlossen werden.

Zudem wurde auf einer kleinen Anzahl der Abriebpartikel auf der Oberfläche deutlich kleinere Partikel festgestellt, welche in Form (rundlich) und Grösse (50 – 200 nm) ebenfalls recht vergleichbar sind. Diese kleinen Partikel weisen gemäss EDX-Analyse einen hohen Bleigehalt auf und waren sowohl auf den grösseren Abriebpartikeln als auch auf dem Filter inhomogen verteilt. Grösse und Morphologie der bleihaltigen Agglomerate deuten nicht auf einen Abrieb hin (siehe Abbildung 19 als typisches Bild verschiedener Analysen).

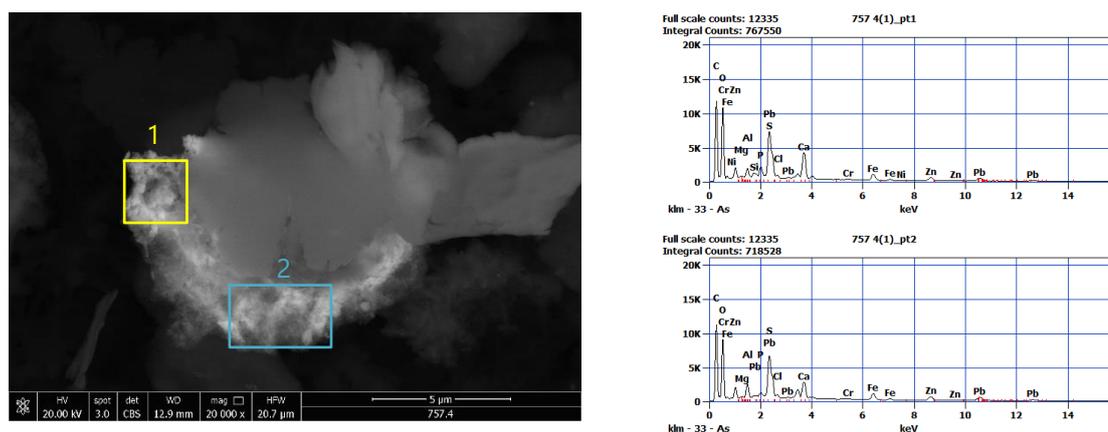


Abbildung 19: REM-Aufnahme eines Eisenpartikels (links) sowie EDX-Spektrum (rechts) der zwei auf der REM-Aufnahme bezeichneten Agglomerate

Die Menge an Blei in Form dieser kleinen Partikel ist sehr gering im Vergleich zur hochgerechneten Menge, die im Motorenöl analysiert wurde. Das Blei liegt somit vorwiegend in gelöster Form vor. Als Ursprung kommen zwei Möglichkeiten in Betracht: es könnte sich um Bleiablagerungen handeln, die noch vom früheren Betrieb mit verbleitem Benzin stammen oder aber der MTBE greift bleihaltige Bauteile an. Ersteres ist wahrscheinlich, da das Fahrzeug über mehrere Jahrzehnte mit verbleitem Benzin betrieben wurde und sich an verschiedenen ölführenden Orten Bleiablagerungen gebildet haben könnten, die sich nun aufgrund der leicht höheren Löslichkeit von MTBE mit biosynthetischem Benzin langsam auflösen. Zweiteres ist demgegenüber eher unwahrscheinlich, da der Einfluss des höheren Anteils an MTBE beziehungsweise die etwas höhere Löslichkeit des biosynthetischen Treibstoffs – als einzig signifikantem Unterschied zu fossilem Benzin – dafür als zu gering eingestuft werden muss.

Die Löslichkeit einer Substanz kann anhand ihrer Elutionskraft abgeschätzt werden. Diese beschreibt die Fähigkeit, chemische Verbindungen oder Ablagerungen aus oder von einer Substanz heraus- oder abzulösen oder zu extrahieren. MTBE weist etwas höhere Elutionskräfte auf als Benzin, aber deutlich geringere als Methanol oder Ethanol.

Um einen Angriff von MTBE auf bleihaltige Lager ausschliessen zu können, wurde bei Motorex im Oellabor ein Versuchsaufbau realisiert, bei dem bleihaltige Lagerschalen während 330 Stunden bei 80 °C einem MTBE-angereicherten Motorenöl ausgesetzt wurde (Abbildung 20). Die Expositionsdauer von 330 Stunden würde in einem Fahrzeug bei einer mittleren Geschwindigkeit von 50 km/h einer Fahrleistung von 16'500 km entsprechen. Die Oberflächen der Lagerschalen wurden vor dem Versuch mit Schleifpapier poliert.



Abbildung 20: Bleihaltige Lagerschalen (links) und Versuchsaufbau (rechts) zur Untersuchung des Angriffs durch ein Gemisch von 10% MTBE und 90% TOPAZ SAE 20W-50 bei 80°C

Die anschliessende Untersuchung der Lagerschalen zeigt keine Veränderungen am Lagermaterial; allerdings wurde während der Exposition von 330 Stunden bei 80°C ein geringer Anstieg des Bleigehalts im Motorenöl von 4 auf 13 ppm festgestellt. Daneben zeigte sich das Motorenöl nach den Versuchen unverändert und auch an den Bauteilen ist keine Oxidation, Korrosion oder anderweitige chemische Reaktion erkennbar. Der geringe Anstieg des Bleianteils wird mit grosser Wahrscheinlichkeit nicht auf die leicht höhere Löslichkeit von MTBE im Vergleich zu Benzin zurückzuführen sein, sondern darauf, dass Blei ein weiches Material ist und sich leichter von Oberflächen ablöst als andere Werkstoffe. Konkret bedeutet dies, dass der Bleieintrag in das Motorenöl in dieser geringen Masse auf einen Strömungseffekt des Versuchsaufbaus zurückzuführen ist und ein Bleiangriff durch das MTBE ausgeschlossen werden kann.

Neben den oben genannten Laborversuchen wurden die Fahrversuche mit dem Chrysler Valiant mit biosynthetischen Benzin nach einem erneuten Ölwechsel um zusätzliche rund 1'000 km weitergeführt. Parallel dazu wurde ein Zweitfahrzeug des gleichen Typs mit vergleichbarer Motorisierung in den Vergleich aufgenommen, das aber ausschliesslich mit fossilem Benzin betrieben wurde. Die Ölanalysen während dem Betrieb der beiden Fahrzeuge haben ergeben, dass sich die beiden Fahrzeuge sehr ähnlich verhalten (Abbildung 21). Die Ergebnisse variieren relativ stark, da eine immer gleiche Entnahme von Ölproben nur sehr schwer zu bewerkstelligen ist.

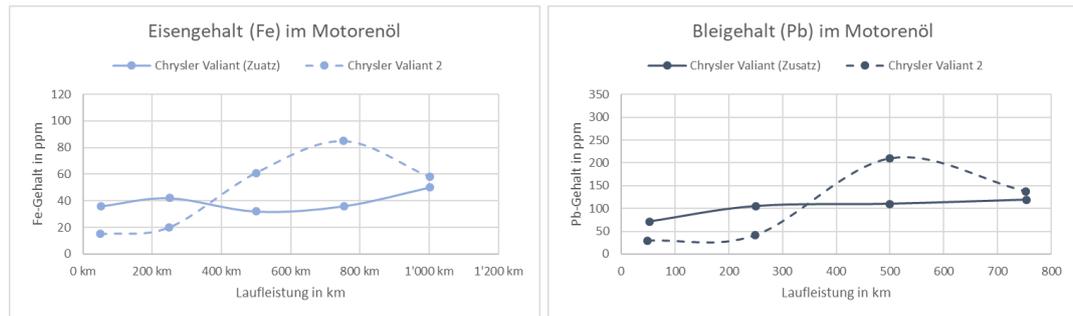


Abbildung 21 Oelanalysen beim Zusatzbetrieb des Chrysler Valiant mit biosynthetischem Benzin und des zweiten, mit fossilem Benzin betriebenen Chrysler Valiant

Die Eisen- und Bleianteile im Motorenöl liegen im Vergleich zum VW Golf (Abbildung 18) sowohl für den mit biosynthetischem Benzin betriebenen Chrysler Valiant wie auch für den parallel dazu mit fossilem Benzin betriebenen Chrysler Valiant auf einem zwar hohen, aber nicht unterschiedlichen Niveau. Es scheint zudem, als dass ein gewisser Eisenabrieb bei diesem Motortyp nicht untypisch ist.

Basierend auf diesen Ergebnissen kann davon ausgegangen werden, dass der Anstieg des Bleianteils im Motorenöl auf die etwas verstärkte Lösung von Bleiablagerungen im Oelsystem zurückgeführt werden kann und nicht auf einen Blei-Angriff von MTBE. Eine etwas höhere Löslichkeit des biosynthetischen Benzins ist eine Folge des erhöhten MTBE-Anteils im Vergleich zu fossilem Benzin. Die unschädliche Aufnahme von Verunreinigungen oder Fremdstoffen ist eine der Aufgaben des Motorenöls, was im vorliegenden Falle offensichtlich gut funktioniert.

Da das Motorenöl von klassischen Fahrzeugen generell wesentlich häufiger gewechselt wird als dies bei modernen Fahrzeugen der Fall ist, kann auch hinsichtlich Ölverträglichkeit von einem unkritischen Einsatz des biosynthetischen Benzins ausgegangen werden. Insgesamt empfiehlt es sich, die Ölwechselintervalle mindestens gleich häufig zu machen wie bei fossilem Benzin.

Abschliessend kann festgehalten werden, dass der Betrieb von klassischen Fahrzeugen mit biosynthetischem Benzin grundsätzlich problemlos möglich ist. Es gibt weder Auffälligkeiten an konkreten Bauteilen, die diesem Treibstoff direkt ausgesetzt sind, noch im regulären Betrieb, die auf den neuen Treibstoff zurückzuführen sind. Zudem sind Abgasverhalten und Leistungscharakteristik nahezu identisch.

Insgesamt scheint biosynthetisches Benzin als geeignet, den Betrieb klassischer Fahrzeuge deutlich klimafreundlicher zu machen, ohne dass die Charakteristik dieser Fahrzeuge durch Umbauten, zum Beispiel auf Elektroantrieb, verändert wird.