

## Technische und ökonomische Aspekte der Verwendung von Äthanol im Vergaserkraftstoff\*

HERBERT FUNK und MARTIN SCHMOLTZI

Institut für landwirtschaftliche Marktforschung

### Einleitung

Ein hoher Anteil flüssiger Energieträger am gesamten Energieverbrauch kennzeichnet die Energieversorgung in den Industrieländern. Die im Gegensatz zu festen Energieträgern außerordentlich vielseitigen Einsatzmöglichkeiten der Erdölderivate ist eine wichtige Grundlage der Diversifizierung der Produktion in den verschiedenen Wirtschaftssektoren. Lange Zeit konnten die Erdölderivate darüber hinaus bei geringem technischen Aufwand zu einem konkurrenzlos günstigen Preis zur Verfügung gestellt werden. Der Preisauftrieb im letzten Jahrzehnt hat allerdings zu einer anhaltenden Verschiebung der Preisrelationen geführt und zu einer Verbesserung der Wettbewerbsstellung unkonventioneller raffinierexterner, teilweise aber früher schon gebräuchlicher Energieträger beigetragen.

Bereits in den Jahren 1920-1940 leistete die Landwirtschaft in einer Reihe von europäischen Ländern über die Produktion von Äthanol einen beachtlichen Beitrag zur Versorgung mit flüssigen Energieträgern. Damals waren Alkoholüberschüsse – die auf einem Überangebot an bestimmten Agrarprodukten und einer rezessionsbedingten Änderung der Absatzstruktur des Alkohols beruhten – die Ursache für die Beimischung von Alkohol zum Vergaserkraftstoff (vgl. *Herlemann*, 1952, S. 190 f.). Auch ohne den Einsatz des dirigistischen Instruments Beimischungszwang bestanden zeitweise gute Absatzmöglichkeiten, weil die qualitativen Eigenschaften des Alkohols sich aus der Palette der wenigen zur Verfügung stehenden Benzinmischkomponenten hervorhoben.

Die technischen Grundlagen der Verwendung von Äthanol als Treibstoff sind teilweise bereits weit entwickelt; so sind die Voraussetzungen der Äthanolbeimischung zum Vergaserkraftstoff seit langem hinreichend bekannt. Vergleichsweise gering sind dagegen die Kenntnisse über die synthetischen Kraftstoffkomponenten, die auch auf Äthanolbasis hergestellt werden können. Die technischen Grundlagen der verschiedenen Konzepte, die für den Vergaserkraftstoffbereich diskutiert werden, und die inzwischen vorgenommenen administrativen Weichenstellungen auf EG-Ebene sollen im folgenden vorgestellt werden. Dabei wird versucht, ökonomische Ansätze zur Abwägung der Chancen und Restriktionen des Äthanoleinsatzes aufzuzeigen.

\*Überarbeitete Fassung des Arbeitsberichtes: *Herbert Funk und Martin Schmoltzi*: Technische und ökonomische Aspekte der Verwendungsalternativen von Äthanol im Kraftstoffsektor. – IflM-Arbeitsbericht 85/3, April 1985.

### 1 Überblick

Nahezu alle der heute als raffinierexterne Benzinmischkomponenten in Frage kommenden Kohlenwasserstoffe zeichnen sich durch ihren Sauerstoffgehalt im Molekül aus; es sind Alkohole und Äther.

Die Oktanzahlen\*1) eines Kraftstoffes sind die herausragenden Qualitätsmerkmale; während die anderen physikalischen Grenzwerte meist kostengünstig erfüllt werden können, ist eine Erhöhung der Pool-Oktanzahl mit überproportionalem Kostenanstieg verbunden. Deshalb werden nur solche raffinierexternen Benzin-Mischkomponenten Interesse auf sich ziehen können, die hinsichtlich ihrer Wirkung auf die Oktanzahlen des Benzins Aufmischqualität aufweisen. Die raffinierexterne Lösung zur Aufhebung eines Oktanzahldefizits besteht – sofern die entsprechenden Anlagen verfügbar sind – in einem verstärkten Einsatz oder einer intensiveren Fahrweise („Schärfe“) der sogenannten Veredlungsanlagen; ein Teil des anfallenden Grundbenzins wird dabei zu einem Benzin mit sehr hohen Oktanzahlen umgewandelt. Steht diese Möglichkeit nicht zur Verfügung, ist eine Veränderung des Verhältnisses von Normal- zu Superbenzin oder eine Verringerung des Benzinanteils an der Gesamtproduktion unausweichlich.

Der Schattenpreis einer raffinierexternen Benzin-Mischkomponente kommt der Summe der Grenzkosten infolge der Veränderungen im Rohstoffbedarf, der Fahrweise und der Auslastung einer Raffinerie gleich. Die Vielfalt der technischen Auslegung von Raffinerien bedingt eine erhebliche Streubreite des Schattenpreises. Für konzernunabhängige Benzinhersteller, die ein Benzin ausschließlich auf der Basis zugekaufter Benzin-Mischkomponenten mischen, wird der Substitutionswert dagegen nur von den an der Norm ausgerichteten physikalischen Eigenschaften bestimmt.

Der Anreiz, sauerstoffhaltige Energieträger in Kraftstoffgemischen oder als Alternativkraftstoffe zu verwenden, hat sich in den letzten fünf Jahren verändert. In den späten 70er Jahren wurde durch eine teilweise Substitution von Erdölprodukten in erster Linie seitens der Mineralölindustrie eine Erhöhung der Versorgungssicherheit und regierungsseitig eine Entlastung der Zahlungsbilanz angestrebt. Für die Bundesrepublik Deutschland ergab sich durch die sich seit 1976 abzeichnende Anspannung der Oktanzahl-Bilanz bei den Vergaserkraftstoffen infolge der reduzierten Bleizugabe ein zusätzlicher Grund, alkoholhaltige Kraftstoffe beschleunigt zu entwickeln. Die gegenwärtige Neigung

\*1) Die Oktanzahlen bilden das Maß für die Klopfintensitäten bei der motorischen Verbrennung.

der Märkte für Rohölderivate zur Überversorgung und die veränderte Anlagenstruktur der rohölverarbeitenden Industrie haben zu einem ausreichenden Oktanzahl-Angebot geführt. Daher kann der Anreiz, sauerstoffhaltige Energieträger neben verbleitem Benzin im Straßenverkehr einzusetzen, zumindest für die nähere Zukunft weniger von deren qualitätssteigernden Eigenschaften als von ihrer Preiswürdigkeit in bezug auf ihren energetischen Wert kommen (Eilerts de Haan, 1984).

Dies wirkt sich auf die Wettbewerbsfähigkeit von Äthanol, auch gegenüber dem billigeren und in größeren Mengen verfügbaren Methanol, zunächst besonders nachteilig aus. Durch die langfristig auch EG-weit bevorstehende vollständige Entfernung bleihaltiger Antiklopffmittel aus dem Fahrzeugbenzin ergibt sich allerdings wieder ein verändertes Bild.

In der Bundesrepublik Deutschland und in Österreich wurde das sogenannte Oxinol 50-Konzept (Zugabe von Methanol und tertiärem Butanol (TBA) zu gleichen Anteilen) zu konventionellem Vergaserkraftstoff rasch akzeptiert. Die Begrenzung auf maximal 3 % Methanol + 3 % TBA als Lösungsvermittler stellte vorläufig noch eine freiwillige Selbstbeschränkung der Mineralölwirtschaft dar, die angeblich von freien Tankstellen nicht immer (je nach Marktlage) eingehalten wurde (Behling, 1984).

Da höhere Gehalte des preisgünstigen Methanols zu einem niedrigeren energetischen Wert je Volumeneinheit Mischkraftstoff führen, besteht hier ein Potential zur Übervorteilung des Verbrauchers, die innerhalb des Bereiches der technischen Meßfehlergrenzen im Einzelfall nicht nachzuweisen ist.

Einen Überblick über die seit kurzem auf EG-Ebene vereinheitlichte Begrenzung der Verwendung von Alkoholen und deren Derivaten in Mischkraftstoffen gibt Tabelle 1:

**Tabelle 1: EG-Richtlinie über den Einsatz sauerstoffhaltiger Komponenten im Benzin**

Komponente	Bemerkung	Zumischungsgrenze (Volumenprozent)	
		Obergrenze (für alle Länder)	Obergrenze ohne Kennzeichnung der Gehalte (wahlweise)
Methanol	Kosolvenz erforderlich	3	3
Äthanol	Kosolvenz wahlweise	5	5
Isopropanol		5	10
Tertiärbutanol		7	7
Isobutanol		7	10
Äther*1)		10	15
Sonst. sauerstoffhaltige Komponenten*2)		7	10
Gemisch sauerstoffhaltiger Komponenten*2); Sauerstoffgehalt		2,5a)	3,7a)

\*1) Methyl-tertiär-Butyläther (MTBE), Tertiär-Amyläther (TAME), Äthyl-tertiär-Butyläther (ETBE) und andere mit mehr als 5 Kohlenstoffatomen, die unterhalb dem Siedepunkt von Benzin siedeln. — \*2) Aceton ist bis zu 0,8 % erlaubt, wenn es als Beiprodukt bei der Herstellung anderer sauerstoffhaltiger Komponenten anfällt. — a) Gewichtsprozent.

Quelle: Richtlinie des Rates vom 5.12.1985 zur Einsparung von Rohöl durch die Verwendung von Ersatz-Kraftstoffkomponenten im Benzin. — Abl. EG Nr. L 334 v. 12.12.1985, S. 20-22.

## 2 Oktanzahlsteigerung

Für die kommenden Jahre ist wieder eine unausgeglichene Oktanzahl-Bilanz in zahlreichen Raffinerien zu erwarten. Dadurch wird der Aufmischwert sauerstoffhaltiger Komponenten steigen (Eilerts de Haan, 1983).

Die kontinuierliche Erhöhung der Klopfestigkeit der Benzine gab der Automobilindustrie die Möglichkeit, die Versichtungsverhältnisse der Pkw-Motoren laufend zu erhöhen, um damit deren spezifischen Verbrauch zu senken. Mit steigender Verdichtung nimmt der thermische Wirkungsgrad bei Vollast wie bei Teilast deutlich zu (Deutsche Shell AG, 1982, S. 8). Die dadurch mögliche Verbrauchersparung ist abhängig vom sogenannten CEP (= Car Efficiency Parameter).

$$\text{CEP} = \frac{\text{Verbrauchsänderung (\%)}}{\text{Veränderung der Oktanzahl (ROZ)}}$$

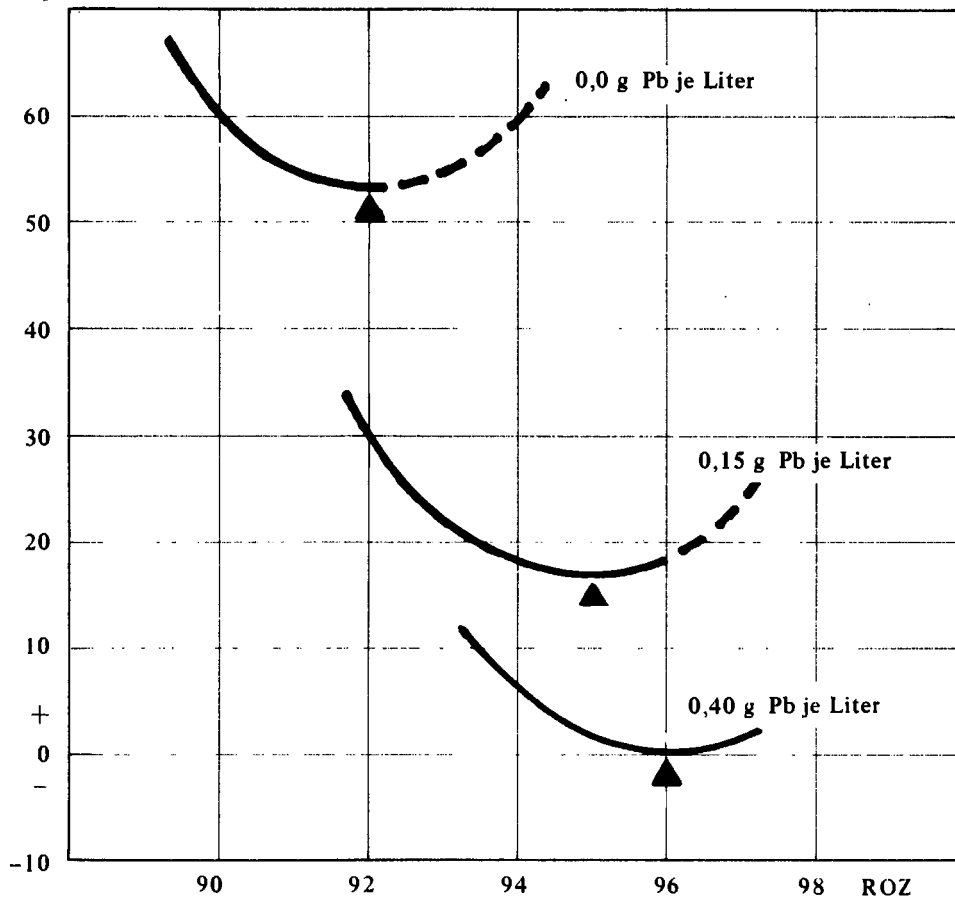
Dieser Wert schwankt bauartbedingt zwischen 0 und 1,6 (Basis Gewichtsprozent) bzw. zwischen 0 und 2 (Basis Volumenprozent). Als Durchschnittswert wird 1 Gewichtsprozent Verbrauchsminderung bei Anstieg der ROZ um 1 angenommen. Hohe Klopfestigkeit ist aber bei sinkender oder sogar fehlender Zugabe von Bleiverbindungen nur auf Kosten eines höheren Energie-Eigenverbrauchs der Raffinerien bei der Kraftstoffherstellung zu gewährleisten. Für ein angenommenes Oktanzahl-Niveau von ROZ 96 gilt: Die Reduzierung des Bleigehalts von 0,4 g Pb/l auf 0,15 g Pb/l, die in den meisten europäischen Ländern noch bevorsteht, erfordert einen um 1,5 % höheren Raffinerie-Eigenverbrauch. Der vollständige Verzicht von Bleizugaben erhöht diesen Eigenverbrauch gegenüber dem 0,15 g Pb/l enthaltenden Kraftstoff sogar um weitere 4,5 % (vgl. Conca, 1978, S. 4 und Conca, 1980, S. 12 f.).

Die Folgen der Absenkung des Bleigehalts können sowohl aus dem Blickwinkel einer Veränderung des Rohölverbrauchs als auch der Verteuerung der Benzinherstellung betrachtet werden; das Kostenoptimum der Raffinerien und das sektorale Energieverbrauchsoptimum liegen relativ weit auseinander.

Da ein sinkender Kraftstoffverbrauch im Fahrzeug mit steigendem Aufwand für die Kraftstoffherstellung einhergeht, läßt sich die für eine hinsichtlich der Minimierung des gesamten Rohölverbrauchs optimale Kraftstoffspezifikation nur durch eine integrierte Betrachtung des Systems Raffinerie — Motor ermitteln. Dieses Optimum liegt in einer durchschnittlichen europäischen Raffinerie für 0,15 g Pb/l enthaltenden Kraftstoff bei einer Pool-Oktanzahl\*2) von 95 ROZ. Die für deutsche Raffinerien geltende Pool-Oktanzahl hält sich bei dem gegenwärtigen Absatzverhältnis zwischen Super- und Normalbenzin mit ROZ 96 geringfügig über diesem Optimum. Sollte bei einem zukünftig vollständigen Verzicht auf Bleizugabe diese Pool-ROZ von 96 beibehalten werden, so würde sich der Gesamtverbrauch um ca. 7 Gewichtsprozent erhöhen. Bei einer Absenkung auf die für unverbleiten Kraftstoff optimale Pool-Oktanzahl 93 ROZ ergibt sich gegenüber der 0,15 g Pb/l-Spezifikation noch immer ein integrierter Mehrverbrauch von mehr als 3 %. Auf diesem Niveau läßt sich nach früheren Angaben der Mineralölindustrie ein erheblicher Teil des gegenwärtigen Pkw-Bestandes in seinem Oktanzahlanspruch nicht befriedigen (Deutsche Shell AG, 1982, S. 10). Andere Untersuchungen weisen auf ein um 1 ROZ niedriger liegendes Optimum hinsichtlich der Minimierung des Rohölverbrauchs für die Herstellung bleifreier Benzins hin (vgl. Abbildung 1). Diese verbrauchsm minimale Spezifikation ist aber nicht gleichbedeutend mit dem wirtschaftlichen Optimum.

\*2) Durchschnittliche Oktanzahl aller produzierten Otto-Kraftstoffqualitäten.

Änderung des Rohölverbrauchs (t)  
je 1000 t Benzin



\* Hinsichtlich der Minimierung des Rohölverbrauchs, CEP = 1. —  
Quelle: CONCAWE 1980, S. 15.

Abb. 1: Einfluß des Bleigehalts auf die optimale\* Oktanzahl

Gemeinsames Kennzeichen der sauerstoffhaltigen Benzin-Mischkomponenten sind die relativ hohen Oktanzahlen, die sie im Gemisch mit einem Grundbenzin entfalten (vgl. Tabelle 2). Eine rechnerische Ermittlung der genauen Oktanzahl ist jedoch nicht möglich, weil insbesondere bei sauerstoffhaltigen Komponenten keine linearen Beziehungen zwischen dem Anteil der Komponente im Gemisch und der „Grund-Oktanzahl“ bestehen\*3). Die „wahre“ Oktanzahl einer sauerstoffhaltigen Komponente im Gemisch mit Benzin hängt von der Art und den Anteilen der sonstigen

Komponenten ab. Es treten unvorhersehbare Mischungseffekte auf. Die Messung von Oktanzahlen nach der standardisierten Methode wird bei einem Wert über 100 ohnehin zunehmend ungenau; für Alkohole ist das Meßverfahren

\*3) Eine „Grundoktanzahl“ kann in einem Prüfmotor ermittelt werden, der nacheinander jeweils mit einer bestimmten Komponente betrieben wird; die dabei gemessenen unterschiedlichen Klopfleistungen des Motors werden zueinander in Relation gesetzt, wobei die Klopfleistungen von Iso-Octan nach internationalen Übereinkünften gleich 100 gesetzt werden.

Tabelle 2: Physikalische Kenndaten wichtiger sauerstoffhaltiger Benzin-Mischkomponenten

Stoff	Abkürzung	Strukturformel	Molekular- gewicht	Sauer- stoff- anteil Gew.-%	R O Z Schwan- kungs- breite	Durch- schnitt	M O Z Schwan- kungs- breite	Durch- schnitt	Dampf- druck (bar)	Heiz- wert(H <sub>u</sub> ) MJ/kg	Dichte bei 20°C (g/ml)	Siede- punkt (°C)
Methanol	MeOH	CH <sub>3</sub> OH	32,043	49,93	120-130	125 (114,4) <sup>a</sup>	91-94	92 (94,6) <sup>a</sup>	0,27	19,74	0,793	64,6
Äthanol	EOH	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	46,07	34,73	106-111	111,4 <sup>a</sup>	89-92	96 (94) <sup>a</sup>	0,15	26,83	0,789	78,3
Isopropanol	IPA	(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> CHOH	60,097	26,62	116-120 <sup>a</sup>	118 <sup>a</sup>	98 <sup>a</sup>	101,9 <sup>a</sup>		30,06 <sup>a</sup>	0,786	
Isobutanol	IBA	(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> CH CH <sub>2</sub> OH	74,124	21,59	102-110 <sup>a</sup>	110,4 <sup>a</sup>	85-89 <sup>a</sup>	90,1 <sup>a</sup>		32,50 <sup>a</sup>	0,804	
Tertiärbutanol	TBA	(CH <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> COH	74,124	21,59	103-108	105	95-96	93	0,04	33,17	0,789	83,0
Methyl-Tertiär- Butyläther	MTBE	(CH <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> C O CH <sub>3</sub>	88,151	18,15	113-120	116	95-102	102	0,51	35,47	0,740	55,2
Äthyl-Tertiär- Butyläther	ETBE	(CH <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> C O C <sub>2</sub> H <sub>5</sub>	102,178	15,66		116		102	0,28	36,03	0,740	73,1

a = Werte gemäß den Angaben von Menrad und König und den dort zitierten Quellen.

Quelle: Verbindungsstelle Landwirtschaft-Industrie e. V., 1983, S. 35. — Menrad und König, 1982, S. 66, 74 und 85.

darüber hinaus wenig geeignet (M e n r a d und K ö n i g , 1982, S. 74). Zur sicheren Ermittlung der Oktanzahlen sind daher empirische Versuchsreihen unumgänglich; wegen der unterschiedlichen Zusammensetzung des Benzinpools ist eine Analyse der Blendwerte von sauerstoffhaltigen Komponenten sehr kostspielig, weil eine Vielzahl von Grundbenzin-Varianten durchgetestet werden müssen. Der Aufwand ist aus der Sicht einer Raffinerie nur zu rechtfertigen, wenn auch absehbar ist, daß Mischkomponenten konkurrenzfähig werden können.

Für die Oktanzahl von Äthanol im Gemisch mit Benzin wird deshalb – wie für die anderen sauerstoffhaltigen Komponenten auch – ein Schwankungsbereich angegeben (Misch-Oktanzahl). Grundsätzlich besteht zwischen der Misch-Oktanzahl des Alkohols und der Oktanzahl des Grundbenzins ein umgekehrt proportionaler Zusammenhang. Die Aufmischung des Alkohols ist also bei Zugabe zu einem Benzin mit bereits hoher Klopfestigkeit geringer als bei Zugabe zu niedrigoktaniger Ware. Da der Markt mit niedrigoktanigen Komponenten reichlich versorgt ist, kann für die Misch-Oktanzahl von Äthanol ein relativ hoher Wert (ca. 106-111 ROZ) angenommen werden. Geht man von einem wenig klopfesten Grundbenzin (z. B. ROZ 78) aus, dann führt eine fünfprozentige Äthanolzugabe zu einer Verbesserung auf etwa 79,6 ROZ. Eine Zugabe von 10 % Äthanol ergibt erst einen Wert von etwa 81,2 ROZ. Höhere Äthanolanteile in Mischkraftstoffen führen in nicht angepaßten Motoren und Verteilsystemen zu Korrosionsproblemen und kommen deshalb allenfalls für eine relativ langsam wachsende Zahl speziell für den Betrieb mit Alkoholkraftstoffen konstruierter Fahrzeuge in Betracht.

Äthanolbeimischungen bis zu 10 % können also nur in geringem Umfang Bleialkyle ersetzen, selbst wenn der von 96 auf 93 ROZ reduzierte Oktanzahlanspruch zugrunde gelegt wird. Äthanolzugaben zu Grundbenzin höherer Klopfestigkeit (z. B. ROZ 91) können zwar den Restbedarf bezüglich des für unverbleiten Kraftstoff optimalen Pool-Oktanzahlanspruchs einbringen, die Klopfestigkeit der bei der derzeitigen Raffineriestruktur im Überschuß vorhandenen Benzinqualitäten liegt allerdings wesentlich niedriger. Äthanol könnte damit erst dann als alleiniges Bleisubstitut voll wirksam werden, wenn durch Veränderungen in der Raffineriestruktur der Anteil weiter veredelter Rohölprodukte wie z. B. katalytisches Reformat (ca. 95 ROZ) oder Steam-Crack-Benzin (ca. 98 ROZ) entsprechend erhöht wird (Concawe, 1980, S. 11).

Die Mineralölindustrie sieht seit der Einführung bleifreien Benzins keine grundsätzlichen Schwierigkeiten mehr, höher veredelte Komponenten bereitzustellen. Allerdings wird dadurch eine zusätzliche Kostenbelastung verursacht, über deren Umfang bisher keine zuverlässigen Angaben verfügbar sind. Eine Studie der Chem. Systems International beziffert allein die auf die westeuropäischen Raffinerien entfallenden Investitionskosten auf 2,7 Mrd. Dollar, um die Anlagenausstattung auf die Produktion von bleifreiem Benzin zu 95 ROZ umzurüsten. Auf die Raffinerien in Frankreich, Italien und Spanien kommen in diesem Zusammenhang vergleichsweise größere Belastungen zu als auf die in anderen Ländern (European Chemical News (ECN), Nr. 1145 vom 24.9.1984, S. 22).

Der durch höheren Kraftstoffverbrauch und höheren preis verursachte Betriebskostenanstieg für einen durchschnittlichen Kfz-Halter wird auf 4 % veranschlagt. Ein steigender Kraftstoffpreis begünstigt aber gleichzeitig auch prinzipiell andere Lösungswege.

Eine dieser anderen Möglichkeiten, auch bei steigendem Bedarf an bleifreiem Benzin und/oder höherer Verdichtungen Oktanzahlanspruch und -angebot im Gleichgewicht zu halten, eröffnet sich durch konstruktive Veränderungen an

den Fahrzeugmotoren. Abgesehen vom sogenannten Hochgeschwindigkeitsklopfen ist klopfestes Benzin nur für relativ kurze spezifische Betriebsphasen erforderlich, z. B. während der Beschleunigung. Der Einbau von Klopfensoren, die die jeweilige Kompression erfassen und damit eine ständige elektronisch gesteuerte Zündverstellung ermöglichen, wird mit steigendem Kraftstoffpreis immer interessanter, da trotz eines bauartbedingt hohen Kompressionsverhältnisses und bei gutem Wirkungsgrad relativ niedrigoktaniger Kraftstoff verwendet werden kann, ohne daß der Motor Schaden durch vorzeitige und unkontrollierte Verbrennung leidet.

Sobald auf Verbraucherebene die diskontierten Mehrkosten eines höheroktanigen Kraftstoffs die Umrüstungskosten einer elektronisch gesteuerten Zündverstellung übersteigen, wäre wieder mit einer Oktanzahlentlastung zu rechnen. Dies gilt allerdings nur unter der Bedingung, daß dann kein nennenswerter Bedarf des Motorenbaus besteht, diesen gewonnenen Spielraum für eine weitere Erhöhung der Verdichtungsverhältnisse zu nutzen. Begrenzend für einen solchen Bedarf wirkt z.B. die Tatsache, daß mit steigender Kompression der Stickoxidausstoß anwächst; ein Zusammenhang, der trotz oder gerade wegen der Einführung der Katalysatortechnik nicht unberücksichtigt bleiben dürfte.

Da diese Entlastung aber erst mittel- bis langfristig wirksam werden kann, wird es zunächst vom Tempo der Einführung bleifreien Benzins und von den Preisverhältnissen bei den verschiedenen oktanzahlsteigernden Mischkomponenten abhängen, in welchem Umfang die Anlagenstruktur in der Mineralölverarbeitung tatsächlich verändert werden muß. Da der zunächst erhöhte Bedarf an den betreffenden hochveredelten Raffinerieprodukten aus den dargelegten Gründen langfristig wieder sinken dürfte, ist anzunehmen, daß die mineralölverarbeitende Industrie eine eher knappe als zu großzügige Kapazitätsplanung vornehmen wird. Dies wird die Marktchancen für raffinerieexterne Komponenten, also insbesondere die Oxygenate, begünstigen (vgl. Tabelle 3).

**Tabelle 3: Entwicklung des Verbrauchs sauerstoffhaltiger Komponenten im westeuropäischen Benzin-Pool (1 000 t)**

Komponente	1982	1983	1990 (Schätzung)
Methanol	135	350	500-1000
TBA*1)	175	400	400-800
MTBE*2)	300	400	700-1200
Sonstige	50	90	200
Insgesamt	685	1265	2000-3400

\*1) Tertiär-Butyl-Alkohol. – \*2) Methyl-Tertiär-Butyl-Äther.

Quelle: European Chemical News, Nr. 1145 v. 24.9.1984, S. 22.

In welchem Umfang Alkohole, insbesondere Äthanol, die ihnen zugeordnete Rolle als „Oktanbooster“ erfüllen können, ist noch nicht zuverlässig vorausszusehen. Das Beurteilungskriterium ROZ ist zwar relativ einfach zu ermitteln und wird deshalb auch am häufigsten verwendet, für eine möglichst exakte Bestimmung der im Fahrbetrieb tatsächlich wirksamen Antiklopfeigenschaften ist es aber weniger geeignet (vgl. Waldmann und Seidel, 1979, S. 988). Höhere Aussagekraft hat die Motoroktanzahl (MOZ). Die Differenz zwischen beiden Kennzahlen (= „Sensitivity“) ist bei Alkoholen (insbesondere Methanol) mit 20-30 OZ wesentlich höher als bei Benzin mit ca. 6-12 OZ. So kann z. B. eine 10%ige Äthanolbeimischung die Klopfestigkeit nur um etwas mehr als 1 MOZ steigern, während die entsprechende Verbesserung um 3,2 ROZ eine wesentlich stär-

kere Aufwertung erwarten läßt. Betrachtet man schließlich die noch besser geeignete, weil unter besonders realitätsnahen Bedingungen ermittelte Straßenoktanzahl (SOZ), so kann sich die klopfhemmende Wirkung von Alkoholen unter Umständen (z. B. im Hochdrehzahlbereich) sogar in ihr Gegenteil verkehren (Schliephake, 1983a, S. 8). Der Aufmischwert von Äthanol hängt somit auch erheblich vom Ergebnis der Entscheidung des Gesetzgebers ab, die Höchstgeschwindigkeit auf Landstraßen weiter herabzusetzen und ein generelles Tempolimit auf Autobahnen einzuführen oder nicht. Im Falle von Geschwindigkeitsbegrenzungen wäre dem Äthanol ein wesentlich höherer qualitätssteigernder Effekt zuzuschreiben als unter gegenwärtigen Bedingungen. Unter Vernachlässigung eventueller negativer Einflüsse auf das Betriebsverhalten bei extremen Bedingungen (z. B. Hochdrehzahlbereich) kann für eine 10%ige Äthanolbeimischung eine Wertsteigerung von ca. 1,17 Pf/l Mischkraftstoff errechnet werden, wenn eine lineare Beziehung zwischen Oktanzahlsteigerung und dafür erforderlichem Aufwand zugrunde gelegt wird. Möglich ist auch die Annahme, daß diese Beziehung progressiv ansteigt. Wenn also gemäß dem Grenzkostenprinzip jeweils die letzte, mit dem höchsten Grenzaufwand verbundene MOZ dem zugemischten Äthanol zugerechnet werden soll, könnte eine wesentlich höhere Wertsteigerung angenommen werden. Grundlage dieser Berechnung ist eine mit 7 Pf/l angenommene Preisdifferenz zwischen Normal- und Superbenzin ( $\Delta$  MOZ = 6). Damit wäre einem allein auf Basis Energieäquivalenz ermittelten Substitutionswert von Äthanol ein Betrag von ca.  $1,17 : 0,1 = 11,7$  Pf/l zuzuschlagen\*4).

Geht man von einem Raffinerieabgabepreis (ohne Steuern) von 65 Pf/l aus, dann liegt dieser energieäquivalente Substitutionswert bei  $65 \cdot 20,60^{*5} : 31,32 = 42,75$  Pf/l Äthanol, der unter Berücksichtigung des ermittelten Zuschlags aber um mindestens 11,7 Pf/l zu erhöhen ist.

Der um die qualitätssteigernden Eigenschaften korrigierte Substitutionswert von Äthanol beträgt damit beim Kraftstoffpreisniveau im April 1985 54,45 Pf/l. Aufgrund der zu erwartenden mittelfristigen Anspannung der Oktanzahlbilanz kann vorübergehend sogar ein noch höherer Wert angenommen werden, so daß aus heutiger Sicht (April 1985) rechnerisch von einer Äthanolverwertung als Kraftstoffmischkomponente zwischen ca. 55 und 65 Pf/l auszugehen ist. In bestimmten Raffinerien kann in Abhängigkeit von der technischen Auslegung auch ein Wert von 70 Pf/l realistisch sein.

Darüberliegende Bereitstellungskosten würden demgemäß einen Subventionsbedarf verursachen, der dem Differenzbetrag entspricht. Äthanol, das zu einem Preis unterhalb des Bereiches 55-70 Pf/l bereitgestellt werden könnte, wäre in der Lage, Benzin aus eigener Kraft zu verdrängen.

Als oktanzahlsteigerndes Oxygenat konkurriert Äthanol direkt mit Methanol. Die Vorschätzungen für die wahrscheinlichen Welt-Methanolkapazitäten bis Ende der 80er Jahre werden zwar angesichts der seit 1982 deutlich entspannten Lage auf den Rohölmärkten offensichtlich wieder leicht nach unten korrigiert, von einer schnell wachsenden Verfügbarkeit ist jedoch in jedem Fall auszugehen (vgl. Tabelle 4). Westeuropa wird davon weniger durch eine Erhöhung der Eigenproduktion (die rückläufige Rohölverarbeitung kann sogar zu einer Abnahme führen), als vielmehr durch eine Ausweitung des Welthandels profitieren. Die Zahl der Länder, die Methanol exportieren können, wird in den 80er Jahren rasch zunehmen. Vor allem Staaten mit

\*4) Bei Annahme einer progressiven Beziehung käme ein entsprechend höherer Zuschlag zustande.

\*5) Relation der volumetrischen Heizwerte ( $H_u$ ) von azeotropem Äthanol (4,4 Gewichtsprozent Wasser) und Benzin.

Tabelle 4: Projektion der Welt-Methanolversorgung

Anlagenkapazität (Mill. t)			
Gebiet	1982	1987	1995
Westeuropa	3,2	2,6*1)	3,5
Nordamerika	6,6	7,7	7,5
Japan	1,2	0,3	-
Osteuropa	3,6	5,8	6,5
Sonstige	1,7	6,5	9,0
Insgesamt	16,3	22,9	26,5
Verbrauch (Mill. t)			
Vorgang	1983	1995	
Konventionelle Verwendung	10,0	12,9	
Neue Absatzbereiche	1,8	9,8	
davon Essigsäure	0,6	1,0	
MTBE	0,5	1,3	
Mischkomponente im Benzin	0,6	4,0	
Reinkraftstoff*2)	0,02	3,0	
Protein	0,08	0,5	
Insgesamt	11,8	22,7	

\*1) Eine andere Schätzung geht für 1988 bereits von 3,4 Mill. t aus (BMFT, 1983, S. 28). - \*2) Einschließlich Verwendung für MTG-Prozeß (Methanol-to-Gasoline).

Quelle: van Wermeskerken, 1984.

günstigen Erdgas-, Kohle- und Mineralölquellen werden zur Verbesserung ihrer Devisenbilanz nach Aufbau einer eigenen chemischen Industrie vermehrt Methanol auf den Weltmarkt bringen. Die Verfügbarkeit von Methanol dürfte weltweit bereits ab 1985 den Bedarf der chemischen Industrie zunehmend übersteigen, so daß dieses Produkt dann verstärkt in den Kraftstoffsektor drängen wird (Bundesminister für Forschung und Technologie (BMFT), 1983, S. 28).

Unter diesem Aspekt ist davon auszugehen, daß die europäischen Kontraktpreise für Methanol, die im September 1984 bei 480 DM/t frei Abnehmer lagen, mittelfristig eher nach unten tendieren als deutlich ansteigen werden\*6) (ECN, Nr. 1145 vom 24.9.1984, S. 8). Setzt man vereinfachend die Eignung von Methanol und Äthanol als Mischkomponente für alkoholhaltigen Kraftstoff gleich und berücksichtigt lediglich ihren unterschiedlichen energetischen Wert, dann dürfte Äthanol aus Biomasse frei Abnehmer und unversteuert höchstens ca. 650 DM/t kosten, um gegenüber Methanol wettbewerbsfähig zu sein. Umgerechnet auf Volumenbasis entspräche dem ein Abgabepreis frei Mischstation von 51,3 Pf/l Äthanol. Somit könnte selbst Äthanol, das zu einem Preis zwischen ca. 51 und 55-70 Pf/l, also gegenüber Benzin voll wettbewerbsfähig anzubieten wäre, nur in den Teilbereich des zukünftigen Marktes für sauerstoffhaltige Energieträger eindringen, der vom billigeren Methanol evtl. mangels Verfügbarkeit nicht abgedeckt werden kann.

Neben der, wenn auch nur eingeschränkt vorhandenen, klopfhemmenden Wirkung werden dem Äthanol in Kraftstoffgemischen weitere positive Eigenschaften zugeschrieben, die aber in einigen Punkten relativiert werden müssen:

1. Das Motiv Umweltschutz\*7), das für eine Äthanolbeimischung sprechen könnte, wurde durch die zugunsten der

\*6) Die für Westeuropa geltenden Spotmarktpreise lagen zu diesem Zeitpunkt um ca. 8 % niedriger.

\*7) Ein Mischungsanteil von 10 % reduziert den CO-Ausstoß um 40 %, den Kohlenwasserstoffen um 25 %, erhöht die  $NO_x$ -Emission aber um 10 %.

katalytischen Abgasreinigung gefallene Entscheidung weitgehend entkräftet. Die Verwendung von Äthanol zur Senkung der Abgaswerte könnte lediglich während der Übergangsphase und auch dann nur mit Ausnahme der Stickoxide eine spürbare Verbesserung bringen (vgl. Schliephake, 1983b, S. 18-20).

2. Als Vorteile des „Euro-Super“-Konzeptes (5 % azeotropes\*8) Äthanol, 2 % Methanol, 2 % TBA) werden besonders der weiche Motorlauf, ein verbessertes Durchzugsvermögen im unteren und mittleren Drehzahlbereich und die Tatsache hervorgehoben, daß eine Anwendung ohne jede Veränderung am Motor erfolgen kann. Das in dem nicht absolutierten Alkohol enthaltene Wasser hat dabei noch die günstige Eigenschaft, die Klopfestigkeit des Gemisches weiter zu erhöhen. Dies bedeutet aber gleichzeitig, daß der energetische Wert des Äthanol um 3,5 % niedriger angesetzt werden müßte. Da dennoch und trotz des im Vergleich zu Benzin bereits erheblich niedrigeren Heizwertes reinen Äthanol (-32 %) bzw. des Methanol (-50 %) bzw. von TBA (-16 %) keine signifikante Verbrauchsänderung zu beobachten ist, wird angenommen, daß durch die Zugabe der drei Alkohole der energetische Wirkungsgrad gegenüber reinem Benzin gesteigert wird\*9).

Kann diese Beobachtung tatsächlich durch einen synergistischen Aufmischereffekt erklärt werden, ist die angestellte Berechnung des Substitutionswertes von Äthanol zu pessimistisch. Statt Energieäquivalenz wird daher vielfach vereinfachend Volumenäquivalenz zwischen Benzin einerseits und den drei beigemischten Alkoholen andererseits zugrunde gelegt. Auf dieser Basis liegt der Substitutionswert von mit einem Anteil von 5 % im „Euro-Super“ enthaltenem azeotropen Äthanol auf Höhe des unversierten Benzinspreises. Je nach Bewertung der oktanzahlsteigernden Wirkung ergäbe sich dann ein Substitutionswert zwischen 76 und etwa 90 Pf/l. Der vermutete Synergismus, der diese Kalkulation ermöglicht, konnte bisher aber nicht eindeutig nachgewiesen werden. Erst wenn exakt festgestellt ist, daß mit „Euro-Super“ kein volumetrischer Mehrverbrauch gegenüber herkömmlichem Superbenzin auftritt, kann der Einwand der Mineralölindustrie ausgeräumt werden, ein Mehrverbrauch sei nur deshalb nicht zu beobachten, weil er wegen des mit 9 % insgesamt relativ geringen Beimischungsanteils der Alkohole innerhalb der meßtechnischen Fehlergrenzen liege.

### 3 Lösungsvermittlung

Während zur Erhöhung der Mischungsstabilität von Benzin-Äthanol-Gemischen u. a. die höheren Alkohole Propanol und Butanol eingesetzt werden können, eignet sich Äthanol selbst – als im Vergleich zu Methanol höherer Alkohol – zur Lösungsvermittlung im wasserempfindlichen methanolhaltigen Kraftstoff. Schätzungen gehen davon aus, daß durch die bereits gebräuchliche Zugabe von Methanol und tertiärem Butanol (TBA) nach dem Oxinolkonzept bis 1990 in der EG nur ca. 20 % des infolge der Bleireduzierung zu erwartenden zusätzlichen Bedarfs an hochoktanigen Komponenten ersetzt werden kann, wenn man von einer ab 1985 forcierten Einführung bleifreien Benzins ausgeht. Dies gilt für einen voraussichtlichen Anstieg der TBA-Kapazitäten in Europa von 460 000 t p.a. in 1983 auf 500 000 t p.a. (1985) bzw. 1 Mill. t p.a. (1990) (Eilerts de Haan, 1984).

\*8) Azeotrop = nicht absolut, enthält 4,4 Gewichtsprozent (= 3,5 Volumenprozent) Wasser.

\*9) Wasseranteil und der geringere energetische Wert (Basis Volumen) ließen theoretisch einem um ca. 3,1 % höheren volumetrischen Kraftstoffverbrauch erwarten.

Unter diesen Umständen wird einer in den USA erprobten Zugabe von 5 % Methanol und 2,5 % Äthanol zu Benzin auch für europäische Verhältnisse eine realistische Chance eingeräumt (van Wermeskerken, 1984). Der Stabilisierungseffekt von Äthanolzugaben, gemessen an der Verschiebung des Trübungspunktes (Entmischungstemperatur), ist mit dem der Beimischung von TBA durchaus vergleichbar. Hinsichtlich des Siedeverhaltens ist Äthanol dem TBA allerdings deutlich unterlegen. Die hohe Verdampfungswärme der niederen Alkohole Methanol und Äthanol und ihre Neigung zur Bildung von azeotropen Gemischen mit Wasser führen leicht zu Kalt- und Heißstartschwierigkeiten (Schliephake, 1983a, S. 5-7). Ein eventueller synergistischer Stabilisierungseffekt der gleichzeitigen Zugabe von Methanol und Äthanol kann nicht festgestellt werden (Menrad und König, 1982, S. 83).

Für tertiäres Butanol werden Spotmarktpreise (1983) von 830-860 DM/t genannt. Wiederum lediglich um den unterschiedlichen Heizwert bereinigt, also unter der vereinfachenden Annahme ansonsten gleicher Eignung beider Alkohole als Kosolvent, errechnet sich somit ein Substitutionswert von Äthanol in bezug auf den Ersatz von TBA als Lösungsvermittler in methanolhaltigen Gemischen von 671-695 DM/t bzw. 52,9-54,8 Pf/l Äthanol\*10).

Während die Berücksichtigung der etwas verschiedenen anwendungstechnischen Eigenschaften, deren quantitative Bewertung sehr schwierig ist, zu einem etwas niedrigeren Wert führen würde, gibt es aber auch Gründe, die einen zukünftig höheren als den genannten Substitutionswert vermuten lassen. Die prognostizierte Verfügbarkeit von TBA könnte nämlich empfindliche Einschränkungen durch den steigenden Verbrauch des Ausgangsproduktes der TBA-Synthese, Isobuten, erfahren. Denn Isobuten ist außerordentlich knapp geworden, weil es zunehmend zur Herstellung von Äthern verwendet wird und bisher nur in begrenzten Mengen als Nebenprodukt bestimmter chemischer Prozesse anfällt.

### 4 Verwendung zur Komponentensynthese

Neben der direkten Verwendung von Äthanol in Kraftstoffgemischen eignet sich dieser Alkohol auch als Vorprodukt zur synthetischen Herstellung von Kraftstoffkomponenten, darunter insbesondere von Äthern.

Die Äther sind eine Stoffgruppe mit hervorragenden Antiklopfeigenschaften. Sie lassen sich relativ kostengünstig durch Isomerisierung von wenig klopfesten Kohlenwasserstoffen mit Alkoholen herstellen. Äther verursachen weniger Vergaservereisung und Heißstartprobleme als Alkohole (Menrad und König, 1982, S. 101 f.). Außerdem ist die latente Neigung anderer Vergaserkraftstoffe, Metalle zu korrodieren, bei ihnen weniger ausgeprägt. Bei der Herstellung von Äthyl-Tertiär-Butyl-Äther (ETBE) wird Äthanol an Isobuten angelagert. Für eine Beimischung von 10 Volumenprozent ETBE zu Normalbenzin wird eine Steigerung der Klopfestigkeit um 2,2 MOZ angenommen (Schliephake, 1983b, S. 16). Bei linearer Bewertung dieser Qualitätsverbesserung (1,17 Pf/MOZ) errechnet sich ein Zuschlag von  $2,2 \cdot 1,17 = 2,57$  Pf/l ETBE zu dessen energieäquivalentem Substitutionswert in bezug auf Benzin. Dieser beträgt bei einem angenommenen Preis für Normalbenzin vor Steuern von 0,65 DM/l  $0,65 \cdot 26,69 = 31,32 \cdot 11 = 0,554$  DM/l

\*10) Ohne Berücksichtigung der klopfhemmenden (= oktanzahlsteigernden) Wirkung.

\*11) Relation der volumetrischen Heizwerte von ETBE und Benzin.



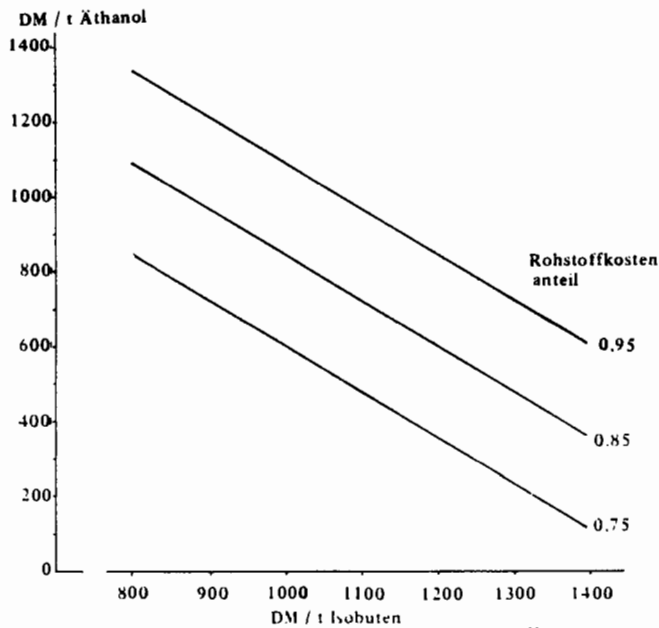
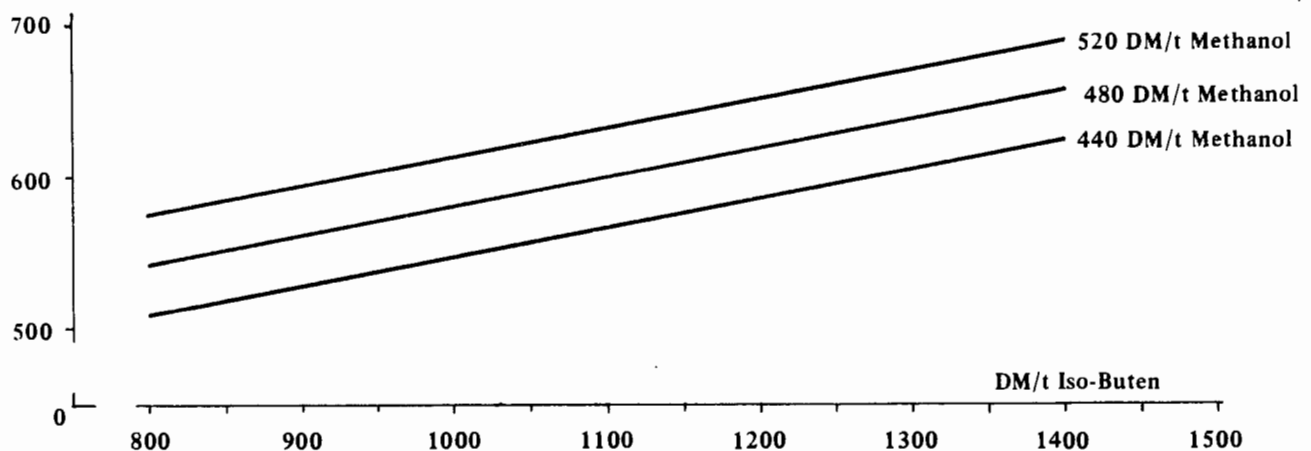


Abb. 2: Obergrenzen der Einstandskosten von Äthanol bei der ETBE-Herstellung in Abhängigkeit vom Preisniveau für ISO-Buten bei unterschiedlichem Verarbeitungs-kostenanteil

ETBE. Damit ist für ETBE von einem effektiven Substitutionswert von 0,811 DM/l auszugehen. Nach Umrechnung auf Gewichtsbasis ergibt sich, daß ETBE frei Mischstation (ohne Mineralölsteuer) maximal 1 096 DM/t kosten darf, wenn seine oktanzahlsteigernde Wirkung nicht höher bewertet werden soll, als durch die gegenwärtige Preisdifferenz zwischen Normal- und Superbenzin zum Ausdruck kommt. Für unterschiedlich hohe Verarbeitungs-kosten ergeben sich die in Abbildung 2 ausgewiesenen Kostengrenzen für die Beschaffung der zur ETBE-Herstellung erforderlichen Rohstoffe.

Das stöchiometrische Inputverhältnis (Äthanol : Isobuten) beträgt dabei 45,1 : 54,9. Wird statt Äthanol Methanol eingesetzt, entsteht Methyl-Tertiär-Butyl-Äther (MTBE), der mit MOZ = 102 dieselbe günstige klopfhemmende Wirkung wie ETBE entfaltet. Hier ist ein Inputverhältnis (Methanol : Isobuten) von 36,4 : 63,6 erforderlich. Daraus ergibt sich, daß durch ETBE das bisher nur begrenzt verfügbare Isobuten besser verwertet wird.

DM/ t Äthanol



\* Bei angenommener gleicher Eignung als Kraftstoffkomponente und gleichen Verarbeitungs-kosten von MTBE und ETBE.

Quelle : Eigene Berechnungen.

Abb. 3: Konkurrenz zwischen ETBE und MTBE: Abhängigkeit des Gleichgewichtspreises für Äthanol von den Einstandskosten für Iso-Buten\*

ETBE und MTBE halten sich in ihrer Konkurrenz-kraft genau dann die Waage, wenn gilt:

$$(1) \quad P_{\text{Ä}} \cdot X_{\text{Ä}} + P_{\text{I}} \cdot X_{\text{IE}} = P_{\text{M}} \cdot X_{\text{M}} + P_{\text{I}} \cdot X_{\text{IM}}$$

mit  $P_{\text{Ä}}$  = Preis für Äthanol

$X_{\text{Ä}}$  = Anteil des Inputs von Äthanol bei der ETBE-Herstellung = 0,451

$P_{\text{I}}$  = Preis von Isobuten

$X_{\text{IE}}$  = Anteil des Inputs von Isobuten bei der ETBE-Herstellung = 0,549

$P_{\text{M}}$  = Preis von Methanol

$X_{\text{M}}$  = Anteil des Inputs von Methanol an der MTBE-Herstellung = 0,364

$X_{\text{IM}}$  = Anteil des Inputs von Isobuten an der MTBE-Herstellung = 0,636

Daraus leitet sich folgende Formel zur Errechnung des Gleichgewichtspreises für Äthanol ab:

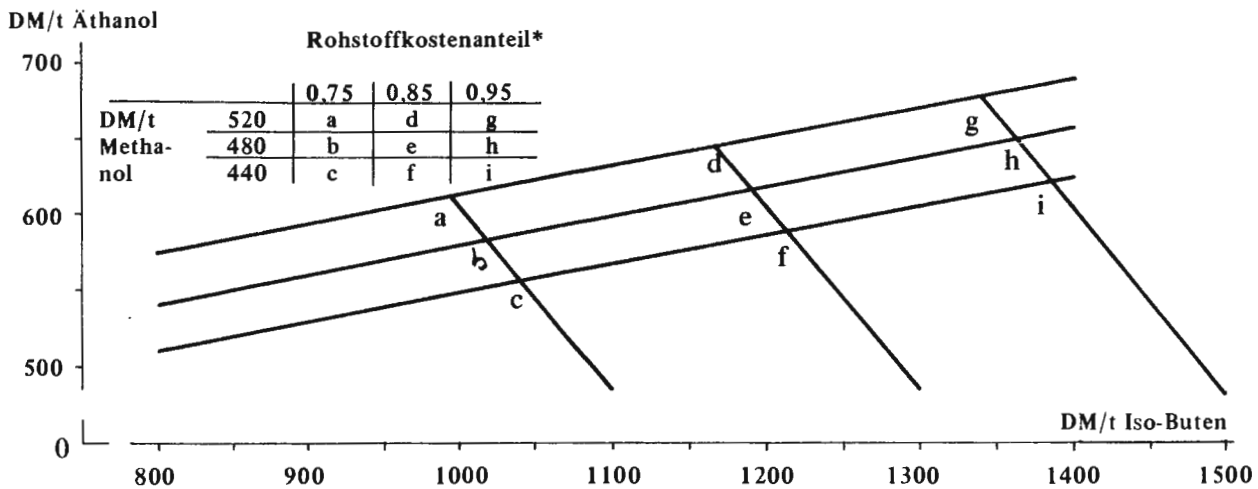
$$(2) \quad P_{\text{Ä}} = \frac{P_{\text{M}} \cdot X_{\text{M}} + P_{\text{I}} \cdot X_{\text{IM}} - P_{\text{I}} \cdot X_{\text{IE}}}{X_{\text{Ä}}}$$

Unter Einsetzung der stöchiometrischen Koeffizienten (d.h. verlustfreie Reaktion der Chemikalien) ist

$$(3) \quad P_{\text{Ä}} = P_{\text{M}} \cdot 0,807 + P_{\text{I}} \cdot 0,193$$

Unter Einsetzung der Preise von Methanol (DM 460/t) und Isobuten (DM 864/t) beträgt der Substitutionswert von Äthanol DM 0,54/kg bzw. DM 0,43/l.

Welcher der beiden Äther letztlich kostengünstiger angeboten werden kann, hängt somit entscheidend vom Preisverhältnis zwischen Methanol und Äthanol sowie dem zwischen dem jeweiligen Alkohol und dem Isobuten ab (vgl. Abbildung 3). Beide für die Wettbewerbsfähigkeit von ETBE maßgeblichen Beziehungen (Bereitstellungskosten und Konkur-



\* Bei der Ätherproduktion. Quelle: Eigene Berechnungen.

Abb. 4: Maximalkostenkombination für gegenüber MTBE wettbewerbsfähige Produktion von ETBE

renz zu MTBE) sind in Abbildung 4 zusammengefaßt dargestellt.

Nur unterhalb der abknickenden Kostenlinien liegende Kombinationen der Rohstoff-Einstandspreise können unter den verschiedenen durch Indizes (a-i) gekennzeichneten Annahmen als für die Verwendung von ETBE in Kraftstoffgemischen günstig angesehen werden. Für Äthanol bedeutet dies, daß dessen Bereitstellungskosten selbst bei optimistischen Annahmen höchstens ca. 645 DM/t (516 DM/m<sup>3</sup>) betragen dürften. Zu diesen für ETBE günstigen Prämissen gehören neben einem relativ hohen Methanolpreis und sehr niedrigen Fixkosten der Verarbeitung hohe Einstandskosten für Isobuten. Diese erscheinen durchaus plausibel, insbesondere bei Annahme einer gleichzeitig steigenden Verwendung von TBA zur direkten Beimischung, da das Angebot von Buten zur Ätherproduktion nach herkömmlicher Technik (Bezugsquelle Rohölverarbeitung) dann eng begrenzt wäre.

Es ist jedoch zu erwarten, daß ein vor etwa 5 Jahren entwickeltes Verfahren der Isobuten-Produktion aus erdgasbütigem Butan verstärkt Anwendung finden wird, wenngleich die Produktionskosten bei diesem Verfahren Ende 1980 noch 14 % über denen eines ebenfalls neuartigen Verfahrens der Isobuten-Gewinnung aus raffinerieinternen C<sub>4</sub>-Strömen lag (Process Economics International, 1980, S. 43). Für diese Erwartung spricht auch der Preisrückgang bei Butan, der zur Zeit noch anhält (Wood, 1984).

Die chemische Industrie in Europa reagierte auf diese Entwicklungen mit einer beträchtlichen Aufstockung ihrer MTBE-Produktionskapazitäten. Schwerpunkte weiterer massiver Kapazitätserweiterungen sind die britischen Inseln. Neben einer Großanlage in Schottland, deren Inbetriebnahme für 1986 vorgesehen ist, soll ein vergleichbares Projekt in Irland realisiert werden, das ebenfalls 500 000 t MTBE/Jahr liefern kann (ECN, Nr. 1147 v. 8.10.1984, S. 30). Damit läge die westeuropäische Produktionskapazität für MTBE bereits Ende der 80er Jahre bei mindestens 1,8 Mill. t p.a. Bezieht man diese Produktionskapazität auf den westeuropäischen Vergaserkraftstoffbedarf, so wird ersichtlich, daß MTBE aus westeuropäischer Produktion in den nächsten Jahren mit ca. 2 % insgesamt nur einen relativ geringen Umfang erreichen kann, während den Vorteilen des MTBE als Kraftstoffkomponente erst Konzentrationen voll gerecht werden, die über 10 Volumenprozent liegen. Es ist zwar davon auszugehen, daß darüber hinaus weitere Anla-

gen zur Herstellung von MTBE in Europa errichtet werden, ein erheblicher Teil des zukünftigen Bedarfs an hochoktanigen Komponenten wird aber sicherlich von aus Erdöl- und Erdgasförderregionen importiertem MTBE abgedeckt werden. Die Anstrengungen einer Reihe von Ländern, darunter u.a. Golf-Anrainerstaaten, zum Aufbau eigener Grundstoffindustrien sprechen für diese Annahme. Der verbleibende Restbedarf kann von anderen hochklopffesten Äthern beansprucht werden. In Frage kommen hier neben dem ETBE der Tertiär-Amyl-Methyl-Äther (TAME) und Di-Iso-Propyl-Äther (DIPE), die voraussichtlich durchweg teurer sein werden als MTBE.

### 5 Äthanol als Reinkraftstoff

Der Einsatz von Alkohol als Reinkraftstoff dürfte für Europa, wenn überhaupt, dann nur punktuell, z.B. für bestimmte Fahrzeugflotten in Frage kommen. In den USA wird zwar ein sog. Methyl-Fuel diskutiert, in dem neben Methanol 5-15 % höhere Alkohole (z.B. Äthanol : Propanol : Butanol im Verhältnis 2 : 3 : 5) verwendet werden sollen, auf Äthanol entfällt damit allerdings auch nur ein sehr geringer Anteil (Menrad und König, 1983, S. 65).

Die Eigenschaft von Wasser, die MOZ beträchtlich zu erhöhen, spricht in Verbindung mit der hohen Wassertoleranz von Alkoholen für deren problemlose und ökonomisch vorteilhafte Verwendung als Reinkraftstoffe. Ihre sehr gute Klopfestigkeit kann hier noch wesentlich besser als in ihrer Verwendung als Mischkomponente zur Erhöhung des Verdichtungsverhältnisses und damit zur Erhöhung des Wirkungsgrades der Verbrennung ausgenutzt werden. Als Vorteil des Äthanol könnte es gewertet werden, daß seine Korrosivität 40 % unter der des potentiellen Hauptkonkurrenten Methanol liegt (Vellguth, 1984).

Das für diesen Verwendungsbereich besonders häufig herangezogene Argument der hohen Umweltfreundlichkeit kann evtl. nur mit erheblichen Einschränkungen akzeptiert werden. Offensichtlich besteht noch nicht genügend Klarheit über das Emissionsverhalten spezieller Alkoholmotoren. In den USA wurde bereits der Betrieb des öffentlichen Personennahverkehrs in einigen Ballungszentren auf Reinmethanol umgestellt, um eine zusätzliche Abgasentlastung zu erreichen. Es zeichnet sich allerdings ab, daß dies nur um den Preis außerordentlich erhöhter Aldehyd-Emiss-



sionen möglich ist, wenn auf eine katalytische Abgasreinigung verzichtet wird (vgl. Obländer u.a., 1984). Dies gilt, wenn auch in etwas geringerem Umfang, ebenfalls für die Äthanol-Verbrennung.

### Zusammenfassung

Es ist versucht worden, technische und ökonomische Aspekte der verschiedenen Verwertungsmöglichkeiten von Äthanol im Kraftstoffsektor aufzuzeigen.

Durch die langfristig auch EG-weit bevorstehende vollständige Entfernung bleihaltiger Antiklopfmittel aus dem Fahrbenzin können sich neue Anreize zur Verwendung von Äthanol oder Äthanolfolgeprodukten als Kraftstoffsubstitute ergeben. Auch nach einer Absenkung der Oktanzahlanforderung infolge einer DIN-Änderung wird die erforderliche Klopfestigkeit nur durch einen erhöhten Aufwand in Destillation und Konversion zu erreichen sein. Äthanol kann in begrenztem Umfang diesen Mehraufwand im Raffineriebereich mindern. Der Versuch einer Bewertung dieses Qualitätsvorteils von Äthanol als Kraftstoffmischkomponente ergab einen Zuschlag von ca. 12 Pf/l Äthanol zu dessen energieäquivalentem Substitutionswert. Daraus resultiert ein tatsächlicher Substitutionswert von ca. 55 Pf/l Äthanol. Bei Zugrundelegung des Prinzips der Grenzverwertung kann unter bestimmten Knappheitsbedingungen und raffinerietechnischen Gegebenheiten eine Erhöhung dieses Betrages auf 60 bis zu ca. 70 Pf/l möglich werden. Zu nahezu gleichwertigen Ergebnissen führt die Bewertung der Verwendung von Äthanol als Lösungsvermittler in Benzin/Methanol-Gemischen. Auch der Einsatz von Äthanol zur Herstellung des Äthers ETBE, der dem bereits als Kraftstoffkomponente eingesetzten MTBE gleichwertige Eigenschaften besitzt, führt selbst unter günstigen Annahmen der Preisentwicklung für Methanol und Isobuten zu keiner weiteren Verbesserung des Substitutionswertes. Für Äthanol günstigere Aussichten wären nur im Falle einer starken Einschränkung der Verfügbarkeit des Hauptkonkurrenten Methanol denkbar oder der Verknappung von Isobuten, welches bei der Herstellung von MTBE und TBA benötigt wird.

### Technical and economic aspects of ethanol in gasoline mixtures

It is to be expected that lead components in motor fuels are to be reduced drastically in years to come. This could result in a new demand for ethanol or ethanol products as a suitable substitute. Ethanol could be used as octane enhancer or as a cosolvent. An attempt to evaluate the specific qualities of ethanol either as a cosolvent or as octane enhancer came to the following results.

On the basis of the price situation in the first half of 1985 the substitution value of ethanol when used up to 5% in a gasoline mixture would have been about 43 Pf/l ethanol if only its energy content is counted. However, quality improvements of the resulting gasoline mixture (higher octane levels) are to be considered. The substitution value then would rise by about 12 Pf/l ethanol such that the actual substitution value would be about 55 Pf/l ethanol. Dependent upon the importance to reach the necessary octane level in certain refineries the ethanol value could even be higher than the average substitution value. The computation of substitution values for ethanol as a cosolvent led to similar results. However, the value of ethanol might even be higher if the use of methanol became more important in the European gasoline pool resulting in a

supply gap of TBA, which is competing with ethanol. If ethanol goes into the production of ethers (ETBE or MTBE) to be used as synthetic fuel components then the resulting substitution value would be quite lower. This would change only if the feedstock of the ethers (and also TBA), isobuten, became scarce and consequently would rise in price.

### Literatur

- Behling, J.: Deutsche Gesellschaft für Mineralölwissenschaft und Kohlechemie, mündliche Auskunft am 2.3.1984.
- Bundesminister für Forschung und Technologie (BMFT): Alternative Energien für den Straßenverkehr – Methanol. – Bonn 1983.
- CONCAWE (The Oil Companies International Study Group for Conservation of Clean Air and Water – Europe) (Hrsg.): A Study on the rational Utilization of Fuels in private Transport (rufit). – Report Nr. 6/78. Den Haag 1978.
- CONCAWE (Hrsg.): The rational Utilization of Fuels in private Transport (rufit). Extrapolation to unleaded gasoline case. – Report Nr. 8/80. Den Haag 1980.
- Deutsche Shell AG: Kraftstoffe für den Markt von morgen. – Aktuelle Wirtschaftsanalysen, Nr. 15. Hamburg 1982.
- Eilerts de Haan, H. E.: Oxygenates – a new way to gasoline. – ARCO Chemical Europe Inc., London 1983.
- European Chemical News (ECN): London, versch. Jgg.
- Herlemann, H.-H.: Branntweinpolitik und Landwirtschaft. – Kieler Studien, H. 21. Kiel 1952.
- Menrad, H. und König, A.: Alkoholkraftstoffe. – Wien 1982.
- Obländer, K. u.a.: The Influence of Oxygenated compounds in Gasoline on Passenger Cars. – Paper presented on the Second European Oxygenated Fuels Conference. Paris 1984.
- Process Economics International 2 (1980), Nr. 1.
- Rat der Europäischen Gemeinschaften: Richtlinie des Rates vom 5.12.1985 zur Einsparung von Rohöl durch die Verwendung von Ersatz-Kraftstoff-Komponenten zum Benzin. – Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften Nr. L 334 v. 12.12.1985, S. 20-22.
- Schliephake, D.: Die Rolle des Ethanols im Kraftstoffmarkt. – Düsseldorf 1983a.
- Schliephake, D.: Ist Bio-Alkohol eine Lösung für bleifreies Benzin? – Vortrag, Beiratssitzung der Verbindungsstelle Landwirtschaft – Industrie, Essen am 21.9.1983b.
- Vellguth, G.: Institut für landtechnische Grundlagenforschung der FAL, mündliche Auskunft am 11.7.1984.

Verbindungsstelle Landwirtschaft – Industrie e.V. (Hrsg.): Zum Kraftstoffmarkt in der Bundesrepublik, seiner möglichen Entwicklung und der Bedeutung sauerstoffhaltiger Komponenten im Zusammenhang mit der Herstellung bleifreien Benzins. – Düsseldorf 1983.

Wermeskerken, van J. E.: Marchin' on to Neat Methanol Fuel. – Paper presented on the Second European Oxygenated Fuels Conference. Paris 1984.

Wood, D. T.: New MTBE Facilities in Europe. – Paper presented on the Second European Oxygenated Fuels Conference. Paris 1984.

Verfasser: Funk, Herbert, Dr., Landwirtschaftskammer Hannover und Schmoltzi, Martin, Dipl.-Ing. agr., Institut für landwirtschaftliche Marktforschung der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft Braunschweig-Völkenrode (FAL), Institutsleiter: Prof. Dr. sc. agr. H. E. Buchholz.