

# Experimenteel onderzoek naar het gedrag van alcoholen en mengsels met alcoholen als brandstof voor vonkontstekingsmotoren

Ben Casier, Alexander Coppens

Promotor: prof. dr. ir. Sebastian Verhelst  
Begeleiders: Louis Sileghem, Jeroen Vancoillie

Masterproef ingediend tot het behalen van de academische graad van  
Master in de ingenieurswetenschappen: werktuigkunde-elektrotechniek

Vakgroep Mechanica van Strooming, Warmte en Verbranding  
Voorzitter: prof. dr. ir. Jan Vierendeels  
Faculteit Ingenieurswetenschappen en Architectuur  
Academiejaar 2012-2013





# Experimenteel onderzoek naar het gedrag van alcoholen en mengsels met alcoholen als brandstof voor vonkontstekingsmotoren

Ben Casier, Alexander Coppens

Promotor: prof. dr. ir. Sebastian Verhelst  
Begeleiders: Louis Sileghem, Jeroen Vancoillie

Masterproef ingediend tot het behalen van de academische graad van  
Master in de ingenieurswetenschappen: werktuigkunde-elektrotechniek

Vakgroep Mechanica van Strooming, Warmte en Verbranding  
Voorzitter: prof. dr. ir. Jan Vierendeels  
Faculteit Ingenieurswetenschappen en Architectuur  
Academiejaar 2012-2013



De auteurs geven de toelating deze masterproef voor consultatie beschikbaar te stellen en delen van de masterproef te kopiëren voor persoonlijk gebruik. Elk ander gebruik valt onder de beperkingen van het auteursrecht, in het bijzonder met betrekking tot de verplichting de bron uitdrukkelijk te vermelden bij het aanhalen van resultaten uit deze masterproef.

*The authors give permission to make this master dissertation available for consultation and to copy parts of this master dissertation for personal use. In the case of any other use, the limitations of the copyright have to be respected, in particular with regard to the obligation to state expressly the source when quoting results from this master dissertation.*

Gent, juni 2013

De auteurs

Ben Casier

Alexander Coppens

# Voorwoord

Het ter perse gaan van deze thesis is een mijlpaal die niet moet onder doen voor de andere grote momenten in mijn leven. Het symboliseert namelijk het afsluiten van de academische carrière als student en de daarmee gepaard gaande overgang naar het 'echte' leven zoals niet-studenten het wel eens durven noemen. Ook in deze volgende fase is het niet mogelijk om zonder ondersteuning en af en toe een helpende hand de beste resultaten te boeken, en dat was voor deze thesis evenzeer het geval. Vandaar een welgemeende dankjewel aan alle mensen die er met hun inspanningen hebben voor gezorgd dat onderliggend resultaat kon worden bewerkstelligd.

De onmiskenbare passie en encyclopedische kennis van prof. dr. ir. Sebastian Verhelst inzake zijn vakgebied zetten mij er in eerste instantie toe aan om voor dit onderwerp te kiezen. Gedurende het onderzoek was hij ondanks een drukke agenda altijd bereid om met een kritische kijk onze resultaten naar een hoger niveau te tillen. Eenzelfde dankbetuiging gaat uit naar onze begeleiders ir. Louis Sileghem en ir. Jeroen Vancoillie die tussen hun eigen deadlines door altijd de tijd vrijmaakten om een extra dimensie toe te voegen aan ons werk en ons terug op het juiste spoor te zetten.

Een bijzondere vermelding voor Koen Chielens is hier zeker ook op zijn plaats. Zonder zijn praktisch grenzeloze bijstand zou ons experimentele werk een stuk minder gesmeerd verlopen zijn. Bij elektrische en softwaregerelateerde problemen met de proefstanden konden we steeds terecht bij Patrick De Pue en Yves Maenhout. Ook het administratieve werk van Annie Harri en Griet Blondé wordt sterk gewaardeerd.

Bedankt ook aan de Karel de Grote Hogeschool om ons een cilinder met NO<sub>x</sub> kalibratiegas te lenen, het ontbreken van deze snelle oplossing had het tijdschema van onze metingen sterk kunnen hypothekeren. Graag bedanken we ook nog BioMCN voor het leveren van methanol en AlcoBioFuel voor het leveren van ethanol. Alsook nog Interreg Vlaanderen - Zuid-Nederland voor het bekostigen van de Volvo en Audi proefstand en bijhorende DAQ en meetapparatuur.

Het is een feit dat ik nooit had kunnen staan waar ik nu sta zonder mijn ouders. Ik wil hen dan ook uitvoerig bedanken voor de mogelijkheid tot studeren en hun onvoorwaardelijke steun door dik en dun. Ook mijn broer Evert en zussen Lies en Tine verdienen een eervolle vermelding voor hun rol in dit verhaal. Hetzelfde geldt voor mijn vrienden die ervoor gezorgd hebben dat ik kan terugkijken op enkele fantastische jaren.

Hoewel hij reeds bedankt werd in de vorige paragraaf heeft mijn thesispartner Alexander een extra blijk van waardering zeker verdiend. Met jouw ongebreidelde inzet was het steeds een plezier om net dat tandje bij te steken, terwijl de kwaliteit van het hier gepresenteerde werk in grote mate aan jouw technische inzichten en skills toe te schrijven is. Dit alles doet er bij mij geen twijfel over bestaan dat er jou een mooie toekomst te wachten staat!

Ben, juni 2013

# Voorwoord

Deze masterthesis afronden kan men gerust beschouwen als de spreekwoordelijke kers op de taart van een geslaagd leerparcours. Het betekent ook het afsluiten van een mooie periode in mijn leven en het begin van een nieuw avontuur. Daarom zou ik hier graag even bij stilstaan en enkele mensen oprecht bedanken die hebben bijgedragen aan deze thesis.

In de eerste plaats wil ik graag onze promotor Prof. dr. ir. Sebastian Verhelst bedanken om ons mee te nemen in zijn enthousiasme en om ons dit interessante onderwerp aan te bieden. Zijn advies en opbouwende kritiek hebben ons ongetwijfeld geholpen om het niveau van deze thesis te verhogen. Hiernaast zou ik ook graag onze begeleiders ir. Louis Sileghem en ir. Jeroen Vancoillie bedanken. Ze waren steeds paraat om ons bij te staan met raad en daad waardoor ze een enorme meerwaarde betekenden voor ons en onze thesis.

Vervolgens zijn er nog enkele mensen die niet rechtstreeks verbonden zijn met de thesis, maar die desalniettemin een belangrijke bijdrage hebben geleverd en dus op z'n minst een woord van dank verdienen. Vooreerst een meer dan oprecht dankwoordje voor Koen Chielens, zijn grenzeloze praktische kennis heeft onze problemen meerdere malen verholpen dit jaar. Daarnaast dank ik ook graag Patrick De Pue en Yves Maenhout voor de hulp bij onze elektronica- en computerproblemen. Ook de administratieve bijstand van Griet Blonde en Annie Harri werd zeer geapprecieerd.

Bedankt ook aan de Karel de Grote Hogeschool om ons een cilinder met NO<sub>x</sub> kalibratiegas te lenen, het ontbreken van deze snelle oplossing had het tijdschema van onze metingen sterk kunnen hypothekeren.

Graag bedanken we ook nog BioMCN en AlcoBioFuel voor het leveren van respectievelijk methanol en ethanol. Alsook nog Interreg Vlaanderen - Zuid-Nederland voor het bekostigen van de Volvo en Audi proefstand en bijhorende DAQ en meetapparatuur.

Uiteraard wil ik ook graag mijn ouders bedanken voor de mogelijkheid die ik gekregen om te studeren en voor de onvoorwaardelijke steun gedurende al die jaren. Ook zou ik graag mijn vrienden willen bedanken voor hun steun en voor de talrijke onvergetelijke momenten de voorbije jaren.

Ten slotte wil ik graag eindigen met een meer dan verdiende dankjewel voor mijn thesis-partner Ben, het was echt een waar genoegen om met jou aan deze thesis te mogen werken. Jouw technisch inzicht, eindeloos enthousiasme en doorzettingsvermogen betekenden een enorme meerwaarde voor het halen van het huidige niveau van deze thesis. Ik kon mij geen betere thesispartner indenken en ik twijfel er dan ook geen seconde aan dat er jou een zeer mooie en succesvolle toekomst te wachten staat!

Alexander, juni 2013

# Experimenteel onderzoek naar het gedrag van alcoholen en mengsels met alcoholen als brandstof voor vonkontstekingsmotoren

door

Ben Casier & Alexander Coppens

Scriptie ingediend tot het behalen van de academische graad van  
Master in de ingenieurswetenschappen: werktuigkunde-elektrotechniek

Promotoren: prof. dr. ir. Sebastian Verhelst

Scriptiebegeleider: ir. Louis Sileghem & ir. Jeroen Vancoillie

Faculteit Ingenieurswetenschappen en Architectuur

Universiteit Gent

Academiejaar 2012-2013

Vakgroep Mechanica van Stroming, Warmte en Verbranding

Voorzitter: prof. dr. ir. J. Vierendeels

## Overzicht

**Deel I** bevat een literatuurstudie die voorafgegaan wordt met situatieschets van de omstandigheden waarin deze thesis is ontstaan (**hoofdstuk 1**). De studie handelt over productiemogelijkheden van lichte alcoholen (**hoofdstuk 2**), onboard waterstofgeneratie (**hoofdstuk 3**), de keuze voor lichte alcoholen (**hoofdstuk 4**), sensoren in flexfuel voertuigen (**hoofdstuk 5**), directe injectie (**hoofdstuk 6**) en mogelijke nadelen bij het gebruik van alcoholen als alternatieve brandstof (**hoofdstuk 7**). Het experimenteel gedeelte (**Deel II**) begint met een bespreking van de prestaties en emissies van waterhoudende ethanol (**hoofdstuk 8**). **Hoofdstuk 9** introduceert vervolgens een drieluik over GEM-mengsels, startend met een vergelijking van de drie componenten onderling. Hierna worden de prestaties en emissies van verscheidene GEM-mengsels in (**hoofdstuk 10**) met elkaar vergeleken en afgetoest met de hypothese over deze isostoichiometrische mengsels. Ten slotte eindigt het gedeelte over GEM-mengsels met een kort experiment over het klopedrag van deze mengsels onderling en ten opzichte van de drie basiscomponenten (**hoofdstuk 11**). Het laatste **hoofdstuk (12)** wordt toegewijd aan een conclusie van de experimentele resultaten, aangevuld met enkele toekomstmogelijkheden.

## Trefwoorden

Verbrandingsmotor, waterhoudende ethanol, alcoholmengsels, GEM-mengsels, rendement, emissies

# Experimental Research on the Behavior of Alcohols and Mixtures with Alcohols as Fuel for Spark Ignition Engines

Ben Casier, Alexander Coppens

Supervisor(s): Sebastian Verhelst, Louis Sileghem and Jeroen Vancoillie

**Abstract**— Binary blends of light alcohols and gasoline have already demonstrated great potential as alternative fuel both in previous research and in practice with flex fuel vehicles. Further decarbonisation of transport is feasible expanding the alcohol usage in the fuel pool. This master dissertation discusses two viable options that require little or no infrastructural modification. Experimental results obtained on a throttled 4 cylinder SI engine even prove these fuels to entail additional benefits regarding performance and pollutant emissions. First we review hydrous ethanol which holds a substantial economic advantage over dehydrated ethanol and thus lowers the threshold for customers and producers. Water content (5, 10 and 20 vol%) is varied according to concentrations related to the cost of the dehydration process. With respect to pure ethanol no significant Brake Thermal Efficiency (BTE) differences are attainable.  $NO_x$ -emissions decrease nearly proportional with water content, while  $CO_2$  emission is unaffected. Secondly we examine ternary blends consisting of Gasoline, Ethanol and Methanol - referred to as GEM blends. When blended having the same air-to-fuel ratio (isostoichiometric) as common E85 their compatibility with present-day flex fuel cars and current motor management is a self-explanatory advantage. Furthermore, these blends hold the potential to increase the producible amount of renewable fuel without interfering in the food chain, avoiding the biomass limit. Test results indicate similar BTE for all isostoichiometric blends on the same level as pure ethanol. Emissions of  $NO_x$  and  $CO_2$  are significantly decreased compared to gasoline. Downside for both proposed alternatives is a higher Brake Specific Fuel Consumption (BSFC) resulting in reduced driving range. Nevertheless, the benefits of these fuels are unmistakable and further extensible using the full potential of the alcohols applying direct injection, turbocharging and/or EGR.

**Keywords**—internal combustion engine, spark ignition, hydrous ethanol, GEM, ternary blends, efficiency, emissions

## I. INTRODUCTION

Ethanol is the most common alternative for conventional gasoline replacement in spark-ignited engines. It holds multiple advantages over other renewable transportation technologies including energy density, distribution infrastructure compatibility and the possibility of efficiency improvement and pollutant emissions reduction. As ethanol-gasoline blend introduction and thus ethanol demand is gradually rising worldwide, challenges lie in providing for this demand at a competitive pricing. This master thesis discusses two interesting options that are both suitable for direct use in modern FFV's (so-called drop-in fuels) while satisfying the customers demand for equitable fuel pricing. These proposed concepts act upon the two factors that affect ethanol production price. The use of hydrous ethanol reduces dehydration energy cost and ternary GEM blends push back the biomass limit.

Until recently all fuel grade ethanol was dehydrated to a minimum purity of 99,6 % before blending or direct use as fuel. Ethanol and water form an azeotropic mixture at 95.63 wt% ethanol, this final part of dehydration is the main energy consumer of the fuel production. It is clear a large cost reduction can be realized by reducing this energy demand [1]. Both optimization and dropping of this process are the topic of recent research, while skipping is obviously economically most beneficial. In terms of engine performance, previous work on hydrous alcohols report the potential for improved efficiency and

significantly reduced  $NO_x$ -emissions [2]. Present-day literature however lacks extensive reliable data on hydrous ethanol.

The second method to strengthen alternative fuel competitiveness and increase total alcohol volume in the fuel pool is applying the recently introduced concept of isostoichiometric ternary blends of Gasoline, Ethanol and Methanol [3]. By blending a certain amount of methanol to binary ethanol-gasoline mixtures, a larger volume of AFR-equivalent fuel can be produced with the same amount of ethanol. With this practice, interference with the food chain can be further avoided while providing adequate fuel for more flex fuel vehicles. Although mixture composition does not affect laminar burning velocity proportionally and is expected to decrease with increasing gasoline content [4], similar engine performance and emissions are reported for 4 isostoichiometric GEM blends [3]. The experiments discussed in this work deliver the first results obtained on a production motor test bench with measurement of engine-out emissions.

## II. RESEARCH AND RESULTS

The experimental work discussed in this section is conducted at steady state conditions on a Volvo 4-cylinder 1.8l PFI SI production engine with CR 10.3:1 that was modified to run on gasoline, alcohols and hydrogen.

### A. Hydrous Ethanol

The literary review pointed out that dehydration energy cost rises exponentially starting around 20 vol% remaining water content [1]. This particular ethanol-waterblend together with the intermediate 10 vol% and the near azeotropic 5 vol% blend were chosen and compared to pure ethanol on performance and emissions.

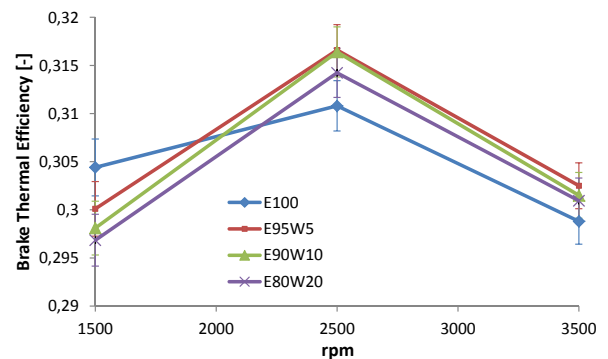


Figure 1: Hydrous Ethanol BTE at 80 Nm,  $\lambda = 1$

Figure 1 shows the BTE of the four fuels at 80 Nm (BMEP= 5.64bar) and  $\lambda = 1$ . We can conclude that no significant efficiency changes arise from a water content up to 20 vol%. Although partly due to large experimental errors, this remarkable conclusion for a blend with 20 vol% (44.72 mole%) of water also applies for the load of 40 Nm. When compared to gasoline, BTE is improved by a significant 1-2%pt. This was expected as laminar burning velocity for ethanol results in more



isochoric combustion. The high latent heat of vaporisation and heat capacity of water also leads to an improved cooling effect and thus efficiency gains through reduced heat losses. Downside of these blends is the significantly higher BSFC in comparison to gasoline because of the lower LHV of alcohols. This implies a reduced driving range in the application of these fuels.

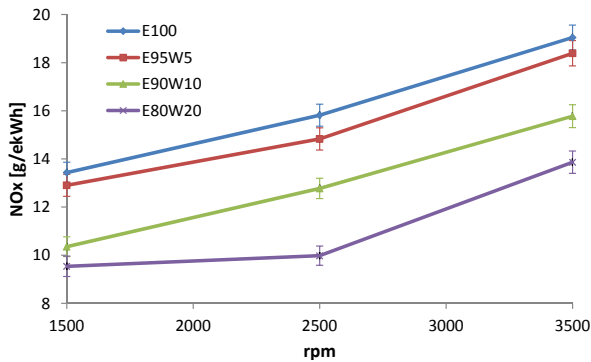


Figure 2: Hydrous Ethanol  $NO_x$  emissions at 80 Nm,  $\lambda = 1$

Specific  $CO_2$  and CO emissions do not significantly alter with changing water content. Figure 2 shows the engine-out  $NO_x$  emissions for the various ethanol-water blends at the load of 80 Nm. The increasing cooling effect with higher water content lowers the adiabatic flame temperature and consequently the in-cylinder temperature. On the other hand the water content decreases the laminar burning velocity, causing a necessary advance in the ignition timing to maintain MBT. This leads to higher in-cylinder temperatures and more time to form  $NO_x$ . The effect of lower temperatures with increasing water content is dominant over the longer presence in the cylinder.

### B. GEM Ternary Blends

The constituents of the blends - Gasoline Euro 95, Ethanol and Methanol - are first separately tested to enable evaluation of blend composition on engine performance and pollutant emissions. Selected blends are iso-stoichiometric with E85 and include G29.5E42.5M28, G37E21M42 and M57.

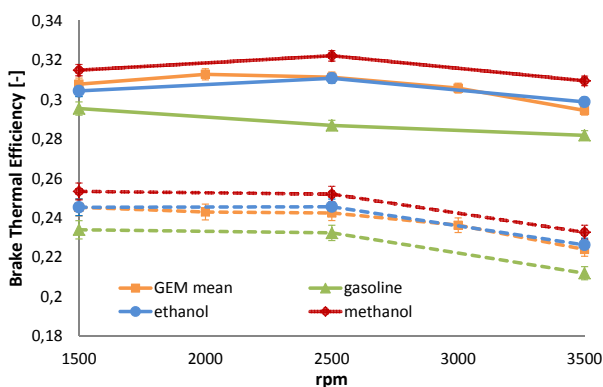


Figure 3: Blend mean + components BTE at 40 Nm (- -) and 80 Nm (—)

As burning velocities for these mixtures decrease only slightly with gasoline concentration [4], MBT timing does not show great variation. While this factor is ruled out, most significant changes will result from a small in-cylinder temperature decrease that is observed with increased overall alcohol content. Similar BTE is reported for all mixtures over the entire speed and load range. As seen on figure 3 the mean BTE for these blends at 40 Nm (BMEP= 2.82bar) and 80 Nm reaches the same BTE as pure ethanol. As well as for pure or hydrous alcohols, lower

LHV penalizes BSFC in comparison to gasoline but this reduction can be limited to 34-40% which is a significant improvement compared to pure alcohols.

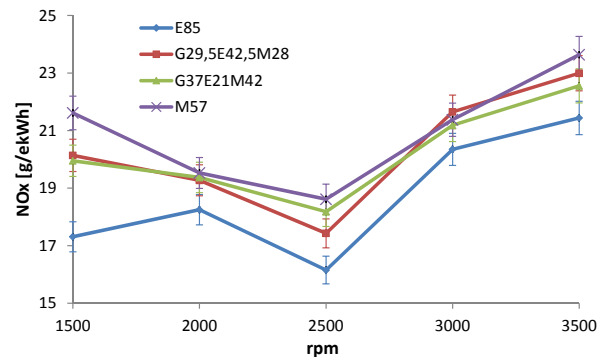


Figure 4: GEM blends  $NO_x$  at 80 Nm,  $\lambda = 1$

Figure 4 shows significant trends in formation of  $NO_x$  due to a slight peak temperature raise with increasing gasoline content. While M57 displays high  $NO_x$  values relative to the other blends, compared to gasoline reductions up to 15% (26% for E85) are feasible.  $CO_2$  shows small gasoline concentration influence due to increased molar mass per carbon atom, up to 8% reduction of specific  $CO_2$  emission compared to pure gasoline can be ascribed to diminished carbon intensity and higher BTE.

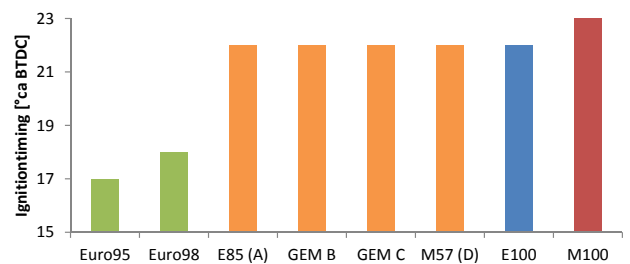


Figure 5: Knock behavior GEM blends at 25 Nm (BMEP= 7.71bar),  $\lambda = 1$

Figure 5 demonstrates similar knock behavior of all GEM blends on a 1 cylinder test engine at 2000 rpm. It is clear further efficiency gains are feasible through aggressive downsizing.

### III. CONCLUSION

Both studied blending concepts exhibit - despite increased BSFC - great potential as renewable fuel. The trade-off between BTE, BSFC and economic advantage situates optimal water concentration in hydrous ethanol at 5-10 vol%, which is conveniently close to the azeotropic limit. Iso-stoichiometric ternary blends are confirmed to be drop-in fuels, thus able to increase alternative fuel volumes with moderate effort. Further research on other engine configurations is necessary to apprehend the full potential of hydrous alcohols and GEM blends.

### REFERENCES

- [1] Joel Martinez-Frias, Salvador M Aceves, and Daniel L Flowers, "Improving ethanol life cycle energy efficiency by direct utilization of wet ethanol in hcci engines," *Transactions- American society of mechanical engineers journal of energy resources technology*, vol. 129, no. 4, pp. 332, 2007.
- [2] T. Huylebroeck and A. Van den Bulcke, "Prestaties en emissies bij het gebruik van alcoholmengsels in vonkstekingsmotoren," *Masterscriptie Universiteit Gent*, 2012.
- [3] J.W.G. Turner, R.J. Pearson, and R. Purvis, "Gem ternary blends: Removing the biomass limit by using iso-stoichiometric mixtures of gasoline, ethanol and methanol," *SAE Technical Paper*, 2012.
- [4] Louis Sileghem, Jeroen Vancoillie, Joachim Demuyneck, Jonas Galle, and Sebastian Verhelst, "Alternative fuels for spark-ignition engines: Mixing rules for the laminar burning velocity of gasoline-alcohol blends," *Energy & Fuels*, vol. 26, no. 8, pp. 4721-4727, 2012.

# Inhoudsopgave

<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>1</b>
<b>I</b>	<b>Literatuurstudie</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Productie van (m)ethanol</b>	<b>5</b>
2.1	Methanol . . . . .	5
2.1.1	Collecteren van energie en oxides . . . . .	7
2.1.2	Dissociatie van oxides [1] . . . . .	8
2.1.3	Brandstofsynthese . . . . .	9
2.2	Ethanol . . . . .	9
2.2.1	Eénstaps extractieve destillatie . . . . .	12
2.2.2	PSA - <i>Pressure Swing Adsorption</i> . . . . .	12
<b>3</b>	<b>On-board waterstofgeneratie</b>	<b>14</b>
3.1	Klassieke reactoren . . . . .	14
3.1.1	Thermische decompositie . . . . .	14
3.1.2	Partiële oxidatie en stoomreforming . . . . .	15
3.1.3	Uitlaatgasreforming . . . . .	16
3.2	Plasmatron convertoren . . . . .	17
<b>4</b>	<b>Waarom (mengsels van) lichte alcoholen?</b>	<b>18</b>
4.1	Algemeen . . . . .	18
4.2	Eigenschappen van pure alcoholen . . . . .	19
4.2.1	Smelttemperatuur . . . . .	20
4.2.2	Verdampingsgedrag . . . . .	20
4.2.3	Vluchtigheid . . . . .	23
4.2.4	Energie-inhoud . . . . .	24
4.2.5	Overige eigenschappen en conclusie . . . . .	25
4.3	Lichte alcoholen . . . . .	27
4.3.1	Voordelen butanol t.o.v. methanol en ethanol . . . . .	28
4.3.2	Nadelen butanol t.o.v. methanol en ethanol . . . . .	29

4.3.3	Conclusie lichte alcoholen . . . . .	31
4.4	Ternaire mengsels . . . . .	32
4.4.1	AFR-waarde, LHV en latente verdampingswarmte . . . . .	34
4.4.2	Destillatiecurve . . . . .	35
4.4.3	Vluchtigheid . . . . .	36
4.4.4	Octaangetal en klopresistentie . . . . .	37
4.4.5	Prestaties en emissies . . . . .	38
4.4.6	Stabiliteit . . . . .	40
4.5	Alternatieve ternaire mengsels . . . . .	41
<b>5</b>	<b>Sensoren en sturing van flexfuelmotoren</b>	<b>44</b>
5.1	Fysieke sensoren . . . . .	45
5.2	Virtuele sensoren . . . . .	47
5.2.1	Exhaust Oxygen sensor . . . . .	47
5.2.2	Cilinderdrukmetingen . . . . .	48
5.3	In-cylinder ion sensing . . . . .	50
<b>6</b>	<b>Directe injectie</b>	<b>54</b>
6.1	Technologische voordelen voor alcoholen . . . . .	54
6.2	Onderzoek specifiek met alcoholen . . . . .	55
6.2.1	Ethanol . . . . .	55
6.2.2	Methanol . . . . .	56
6.2.3	Ternaire mengsels . . . . .	57
<b>7</b>	<b>Praktische realisatie</b>	<b>60</b>
7.1	Faseseparatie . . . . .	60
7.2	Transport . . . . .	61
7.3	Materiaalcompatibiliteit . . . . .	63
7.4	Brandveiligheid . . . . .	65
7.5	Gezondheidsproblemen . . . . .	67
<b>II</b>	<b>Experimenteel</b>	<b>69</b>
<b>8</b>	<b>Waterhoudende ethanol</b>	<b>70</b>
8.1	Verwachtingen . . . . .	70
8.2	Volvo proefopstelling . . . . .	73
8.2.1	Meetprocedure . . . . .	73
8.3	Resultaten . . . . .	74
8.3.1	Vergelijking van één werkingspunt . . . . .	74
8.3.2	Evolutie met toerental en belasting . . . . .	78
8.4	Conclusie . . . . .	86

<b>9 GEM: Componenten</b>	<b>88</b>
9.1 Meetprocedure . . . . .	90
9.2 Resultaten . . . . .	91
9.2.1 Vergelijking van één werkingspunt . . . . .	91
9.2.2 Evolutie met toerental en belasting . . . . .	94
9.3 Conclusie . . . . .	98
<b>10 GEM: Ternaire mengsels</b>	<b>100</b>
10.1 Verwachtingen . . . . .	100
10.2 Resultaten . . . . .	105
10.2.1 Meetprocedure . . . . .	105
10.2.2 Vergelijking van één werkingspunt . . . . .	106
10.2.3 Evolutie met toerental en belasting . . . . .	109
10.3 Conclusie . . . . .	117
<b>11 GEM: Klopgedrag</b>	<b>119</b>
11.1 Verwachtingen . . . . .	119
11.2 Audi proefopstelling . . . . .	120
11.2.1 Meetprocedure . . . . .	121
11.3 Resultaten . . . . .	121
<b>12 Conclusie en toekomstperspectief</b>	<b>124</b>
12.1 Conclusies . . . . .	124
12.1.1 Waterhoudende ethanol . . . . .	124
12.1.2 GEM-mengsels . . . . .	125
12.2 Toekomstperspectief . . . . .	127
<b>III Bijlagen</b>	<b>131</b>
<b>A Technologische voordelen voor alcoholen</b>	<b>132</b>
A.1 Sprayvorming, injector- en verbrandingskamerdesign . . . . .	133
A.2 Injectiestrategie . . . . .	137
<b>B Berekening eigenschappen van ternaire mengsels</b>	<b>139</b>
B.1 Berekening AFR, LHV en LV . . . . .	139
B.2 Vlamsnelheden . . . . .	140
<b>C Berekende grootheden en foutenanalyse</b>	<b>141</b>
C.1 Grootheden en fouten . . . . .	141
C.1.1 Effectief vermogen . . . . .	141
C.1.2 Gemiddelde effectieve druk (BMEP) . . . . .	142

C.1.3	Specifiek brandstofverbruik (BSFC) . . . . .	142
C.1.4	Effectief rendement . . . . .	142
C.1.5	Geïndiceerd rendement . . . . .	143
C.1.6	Mechanisch rendement . . . . .	143
C.1.7	Leveringsgraad . . . . .	143
C.2	Emissiemetingen . . . . .	144
C.2.1	Foutenanalyse . . . . .	144
C.2.2	Omrekening naar specifieke emissie [g/ekWh] . . . . .	144
C.3	Coefficient of Variation . . . . .	146
<b>D</b>	<b>Meetresultaten</b>	<b>147</b>
<b>E</b>	<b>TDC calibration</b>	<b>163</b>
E.1	Installation of the capacitive probe AVL-428 in the engine . . . . .	164
E.2	Power supply and balancing the probe . . . . .	165
E.3	Calibrate the TDC . . . . .	166
<b>F</b>	<b>Configuration of Maihak Multor 610</b>	<b>168</b>
F.1	Basic configuration after memory loss . . . . .	169
F.2	Connect the emission analyzer to the PC . . . . .	169
F.3	Upload the HEX-file using HypterTerminal . . . . .	170
F.4	Calibration using the correct calibration gases . . . . .	171
<b>G</b>	<b>DVD</b>	<b>172</b>
	<b>Bibliografie</b>	<b>173</b>

# Nomenclatuur

## Afkortingen

<i>AFR</i>	Air to Fuel Ratio
<i>AR-AFFF</i>	Alcohol Resistant Aqueous Film Forming Foam
<i>ASTM</i>	American Society for Testing and Materials
<i>BDP</i>	Bovenste Dode Punt
<i>BMEP</i>	Brake Mean Effective Pressure
<i>BSFC</i>	Brake Specific Fuel Consumption
<i>BTDC</i>	Before Top Dead Centre
<i>BTE</i>	Brake Thermal Efficiency
<i>CFD</i>	Computational Fluid Dynamics
<i>CFR</i>	Cooperative Fuel Research
<i>CNG</i>	Compressed Natural Gas
<i>COV</i>	Coefficient Of Variation
<i>CR</i>	Compression Ratio
<i>(C)VVT</i>	(Continuous) Variable Valve Timing
<i>DI</i>	Direct Injection
<i>DISI</i>	Direct Injection Spark Ignition
<i>(D)OHC</i>	(Double) OverHead Camshaft
<i>DME</i>	DiMethylEther
<i>DMF</i>	DiMethylFuraan
<i>DWC</i>	Divided-Wall Columns
<i>ECU</i>	Engine Control Unit
<i>EGO</i>	Exhaust Oxygen Sensor
<i>EGR</i>	Exhaust Gas Recirculation
<i>ETBE</i>	Ethyl Tert Butyl Ether
<i>FFV</i>	Flex Fuel Vehicles
<i>FMEP</i>	Friction Mean Effective Pressure
<i>FPW</i>	Fuel Pulse Width
<i>FS</i>	Full Scale

<i>FTIR</i>	Fourier Transform Infrared Spectroscopy
<i>GDI</i>	Gasoline Direct Injection
<i>GEM</i>	Gasoline-Ethanol-Methanol
<i>GHSV</i>	Gas Hourly Space Velocity
<i>GLAD</i>	Glancing Angle Deposition
<i>GMB</i>	Gasoline-Methanol-Butanol
<i>HC</i>	HydroCarbon
<i>HCCI</i>	Homogeneous Charged Compression Ignition
<i>HDPE</i>	High Density PolyEthylene
<i>ICE</i>	Internal Combustion Engine
<i>IMEP</i>	Indicated Mean Effective Pressure
<i>IVC</i>	Inlet Valve Closing
<i>LED</i>	Light Emitting Diode
<i>LHV</i>	Lower Heating Value
<i>MAF</i>	Mass Air Flow
<i>MAP</i>	Manifold Absolute Pressure
<i>MBT</i>	Minimum spark advance for Best Torque
<i>MON</i>	Motor Octane Number
<i>MTBE</i>	Methyl Tertiär Butyl Ether
<i>MV</i>	Measured Value
<i>MW</i>	Molar Weight
<i>NEDC</i>	New European Driving Cycle
<i>NIR</i>	Near InfraRed
<i>NMEP</i>	Net Mean Effective Pressure
<i>NMHC</i>	Non-Methane HydroCarbon
<i>NTP</i>	Normal Temperature and Pressure
<i>ODP</i>	Onderste Dode Punt
<i>PCA</i>	Principiële ComputerAnalyse
<i>PFI</i>	Port Fuel Injection
<i>PM</i>	Particulate Matter
<i>PMEP</i>	Pump Mean Effective Pressure
<i>PSA</i>	Pressure Swing Adsorption
<i>REGR</i>	Reformed Exhaust Gas Recirculation
<i>RFA</i>	Renewable Fuels Association
<i>RON</i>	Research Octane Number
<i>RVP</i>	Reid Vapor Pressure
<i>SCORE</i>	Single Cylinder Optical Research Engine
<i>Si</i>	Sinle injection

<i>SMD</i>	Sauter Mean Diameter
<i>Sp</i>	Split injection
<i>TP</i>	Throttle Position
<i>TSDI</i>	Two Stage Direct Injection
<i>TWC</i>	Three Way Catalyst
<i>UV</i>	Ultra Violet
<i>WOT</i>	Wide Open Throttle

### **Symbolen en grootheden**

$\alpha$	Verhouding waterstof tot koolstof in brandstof
$\beta$	Verhouding zuurstof tot koolstof in brandstof
<i>B</i>	Brandstofverbruik
<i>ca</i>	Crank Angle
<i>D</i>	Cilinderdiameter
$\lambda$	Luchtfactor
<i>M</i>	Koppel
<i>m</i>	Massa
$\dot{m}$	Massadebiet
<i>MM</i>	Moleculaire Massa
<i>Mol%</i>	Molprocent
<i>n</i>	toerental
$\omega$	Absolute vochtigheid
<i>p</i>	Druk
<i>P</i>	Vermogen
$\phi$	Relatieve vochtigheid
<i>ppm</i>	Parts Per Million
$P_s$	Saturatiedruk
$\rho$	Dichtheid
<i>rpm</i>	Revolutions Per Minute
$\sigma$	Standaarddeviatie
<i>T</i>	Temperatuur
$\theta$	Hoek
<i>tpm</i>	Toeren Per Minuut
<i>V</i>	Volume
<i>Vol%</i>	Volumeprocent
<i>Wt%</i>	Gewichtsprocent
<i>y</i>	Molfractie



# Hoofdstuk 1

## Inleiding

Fossiele brandstoffen worden al in ruime hoeveelheden gebruikt door de mensheid sinds de industriële revolutie. Het is echter pas in het begin van de 20<sup>e</sup> eeuw en nog meer sinds de tweede helft ervan, dat dit gebruik enorm is beginnen toenemen. De laatste decennia wordt men er zich echter steeds meer van bewust dat we te afhankelijk zijn geworden van deze fossiele brandstoffen en dat deze primaire energiebron niet oneindig beschikbaar zal blijven. De voorspellingen voorzien nog slechts een olie- en gasreserve voor respectievelijk 41.2 en 54 jaar en een steenkoolreserve van 128 jaar<sup>1</sup>. Samen met een wereldwijde vraag naar energie die elk jaar stijgt, zorgt dit ervoor dat in de toekomst de prijs voor de ruwe aardolie alleen maar zal blijven toenemen en dus op een bepaald moment onbetaalbaar wordt voor een groot deel van de wereldbevolking.

Naast deze economische problemen is er uiteraard de enorme luchtvervuiling die deze fossiele brandstoffen met zich meebrengen. De laatste jaren wordt er gelukkig meer en meer aandacht besteed aan de uitstoot van schadelijke (broeikas)gassen en stoffen. Een rechtstreeks gevolg hiervan zijn de steeds strenger wordende emissienormen in de transportsector, zoals bijvoorbeeld de huidige *Euro5*-norm<sup>2</sup> in Europa. Er wordt echter nog altijd veel meer CO<sub>2</sub> uitgestoten dan dat er door natuurlijke processen kan worden gerecycleerd.

Al deze verschillende factoren hebben ervoor gezorgd dat er wereldwijd enerzijds wordt gezocht naar meer efficiënte technologieën en anderzijds naar hernieuwbare en propere brandstoffen. Deze zoektocht heeft de laatste jaren al enkele alternatieven opgeleverd, waaronder elektrische motoren, fuel cells en waterstofmotoren. Ze vertonen echter allen nog enkele duidelijke tekortkomingen [3].

---

<sup>1</sup>Getallen gebaseerd op (bewezen) reserves en productie ratio [2]

<sup>2</sup>*Euro6*-norm voor personenwagens en lichte commerciële voertuigen vanaf 09/2014 (enkel bijkomende PM- en PN-emissievoorwaarden voor vonkstekingsmotoren)

In de jaren '70 en '80 was er al sterke interesse in landen als Brazilië (PROALCOOL) en de Verenigde Staten in het gebruik van alcoholen als brandstof. Een dalende olieprijs en verminderende subsidies in de jaren '90 zorgde echter voor een enorme daling van de interesse voor dit alternatief. Door de stijgende benzineprijzen (€1,836/l voor super 98 op 13/09/2012, te België) en de steeds strenger wordende emissienormen, hebben verschillende onderzoeksgroepen wereldwijd de optie van alcoholen terug heropend. De commercialisering op korte termijn van deze alcoholbrandstoffen blijkt ook een stuk minder problemen te vertonen dan bij andere alternatieven. Zo is de opslag- en distributie-infrastructuur met enkele kleine aanpassingen geschikt voor lichte alcoholen en bij grootschalige productie lijkt de kostprijs ook lager te liggen dan de huidige benzineprijzen. Bovendien vertoont deze hernieuwbare brandstof verbeterde eigenschappen ten opzichte van benzine. Hierdoor werd er in de onderzoeksgroep Vervoertechniek aan de Universiteit Gent al gedurende drie jaar een thesis uitgeschreven [4, 5, 3] voor het onderzoek naar lichte alcoholen (vooral methanol) als alternatieve brandstof voor vonkstekingsmotoren.

De lichte alcoholen blijken dus een beloftevol alternatief te zijn als brandstof voor de transportsector. Olah et al. [6] ging hier in 2006 echter nog een stap verder, in hun *'Beyond Oil and Gas: The Methanol Economy'*. Zij zien methanol niet enkel als een alternatieve brandstof, maar als een drijvende kracht voor de hele economie zoals olie en gas dat nu zijn. Zo worden er enkele uiteenlopende manieren om methanol te gebruiken als brandstof besproken zoals bv. methanol fuel cells. Er worden ook een hele reeks verschillende productieprocessen van methanol vergeleken, waarvan er al bepaalde zijn besproken in een voorgaande thesis [5]. Dit zal verder uitgewerkt worden in hoofdstuk 2 van deze thesis. Naast het gebruik van methanol als een brandstof, stellen ze ook voor om het te gebruiken als energieopslagmiddel voor bijvoorbeeld zonne- of windenergie. Ook het synthetiseren van koolwaterstoffen en de hieruit volgende producten startend vanaf methanol, ziet men als een zeer realistisch toekomstperspectief.

Men ziet natuurlijk ook wel in dat een dergelijke overstap naar lichte alcoholen als brandstof niet zal lukken in één dag of in één jaar tijd. Het zal een proces worden dat zich over verschillende jaren uitstrekt en meer dan waarschijnlijk met enkele tussenstappen zal verlopen. Deze tussenstappen zijn al enkele jaren bezig onder de vorm van alcohol/benzine-mengsels, zoals bv. benzine met een kleine hoeveelheid ethanol (tot 10 vol% in E10) al gebruikt wordt in verschillende landen. Of zelfs met ethanol als hoofdbestanddeel (E85) in flexfuelvoertuigen, weliswaar in minder grote aantallen dan E5-E10. Analoog wordt methanol ook al in sommige gevallen gebruikt als toevoeging bij benzine of zelfs in de motorsport (bv. Indycar Series<sup>3</sup>). Daar hernieuwbare ethanol niet met oneindige hoeveelheden geproduceerd kan worden

---

<sup>3</sup>Vanaf 2007 werd overgeschakeld naar ethanol, gesteund door een grote sponsordeal

door de zogenaamde '*biomassalimiet*', kwam Turner et al. [7] met de hypothese om een deel van de ethanol in een E85-mengsel te vervangen door methanol en benzine. Hierdoor ontstaat een ternair mengsel met zowel methanol, ethanol als benzine dat isostoichiometrisch is aan E85 en dus kan gebruikt worden in de huidige flexfuelvoertuigen. Aangezien op deze ternaire mengsels nog maar weinig onderzoek is gedaan, zal dit onderwerp een belangrijk deel worden van deze thesis.

Deze masterproef zal opgedeeld worden in drie grote delen: een literatuurstudie, een experimenteel deel en tenslotte de bijlagen.

In het literatuurdeel zal eerst de productie van lichte alcoholen zoals methanol en ethanol besproken worden (Hoofdstuk 2), gevolgd door een korte uiteenzetting met betrekking tot het concept van on-board brandstofomvorming (Hoofdstuk 3). Hierna volgt een hoofdstuk over waarom men deze lichtere alcoholen verkiest boven de hogere alcoholen als alternatieve brandstof. Vervolgens wordt er dieper ingegaan op (ternaire) mengsels van deze alcoholen (Hoofdstuk 4). Het hoofdstuk hierna sluit nauw aan bij het vorige en bespreekt de sensoren en de sturing van flexfuelvoertuigen in het kader van de 'onzichtbaarheid' van de ternaire E85-mengsels. Dit wordt aangevuld met de mogelijkheid van ion-sensing technologie (Hoofdstuk 5). Vervolgens wordt de optie van directe injectie, een term die geregeld voorkomt in papers over alcoholische brandstoffen, van dichterbij bekeken (Hoofdstuk 6). Als voorlaatste onderwerp wordt de praktische realisatie bij het omschakelen naar alcoholen besproken. De nadruk ligt hier vooral op de nadelen (transport, gezondheid,...) die in vele papers worden stilgezwegen. Uiteraard worden hierbij ook enkele mogelijke oplossingen voorgesteld (Hoofdstuk 7).

Het experimenteel gedeelte begint met de bespreking van een meetset op ethanol-watarmengsels (Hoofdstuk 8). Zoals gezien in de literatuurstudie hebben deze mengsels het potentieel om zowel de motorprestaties en -emissies te verbeteren, alsook economisch voordelig te zijn ten opzichte van pure ethanol. Daarna wordt ter ondersteuning van de resultaten van de GEM mengsels eerst een meetset uitgevoerd waarbij de componenten van deze mengsels apart getest worden (Hoofdstuk 9). Hierop aansluitend worden de resultaten van de metingen op de GEM blends uitvoerig besproken in hoofdstuk 10 waarbij in het laatste experimentele hoofdstuk ook gekeken wordt naar het klopgedrag van deze mengsels (Hoofdstuk 11). Hoofdstuk 12 geeft ten slotte een samenvatting van de belangrijkste conclusies uit dit onderzoek en formuleert enkele mogelijkheden tot verderzetting ervan.

Deel I

# Literatuurstudie

## Hoofdstuk 2

# Productie van (m)ethanol

Het vervangen van benzine en fossiele brandstoffen in de transportsector in het algemeen door alcoholen steunt op de mogelijkheid tot synthetische productie van deze alcoholen uit biomassa. Dit gebeurt uiteraard bij voorkeur op een zo efficiënt mogelijke manier, waarbij de grootste aandacht besteed wordt aan het economische en het milieuaspect. Er bestaan meerdere processen om dit te verwezenlijken, een groot deel hiervan werd reeds besproken in een vorige thesis. [5]

Voor zowel methanol als ethanol wordt hedendaags nog veel onderzoek uitgevoerd naar de optimalisatie van het rendement van deze processen. Er wordt gepoogd om met een zo laag mogelijke energie-input een zo groot mogelijke opbrengst te realiseren. Dit terwijl er aandachtig wordt op toegezien dat de milieuschadelijke uitstoot afkomstig van het productieproces zelf beperkt blijft. Op deze manier kan er verder naar een hernieuwbare en oneindig duurzame manier van transport toegewerkt worden.

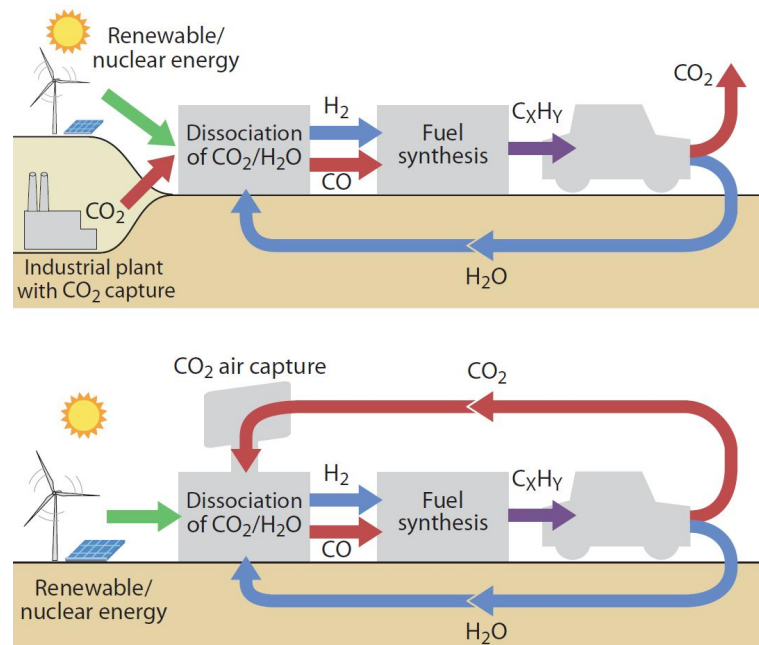
Dit hoofdstuk beschrijft de huidige stand van de techniek voor productie van de lichte alcoholen methanol en ethanol. Verder zal het duidelijk worden dat er nog veel ruimte tot verbetering is in dit onderzoeksdomein en dat de grootste winsten in het verhogen van het rendement van katalysatoren en optimaliseren van procesparameters liggen.

### 2.1 Methanol

De meest gangbare werkwijzen bij de productie van methanol werden reeds besproken in voorgaande werken [5, 8]. Uit deze bronnen kon besloten worden dat de methode van CO<sub>2</sub>-captatie de meest beloftevolle was om tot een hernieuwbare energiecyclus te komen, zonder limiet op de bruikbare biomassa. Mits verdere ontwikkelingen zou uiteindelijk zelfs meer CO<sub>2</sub> kunnen gecapteerd worden dan er geprodu-

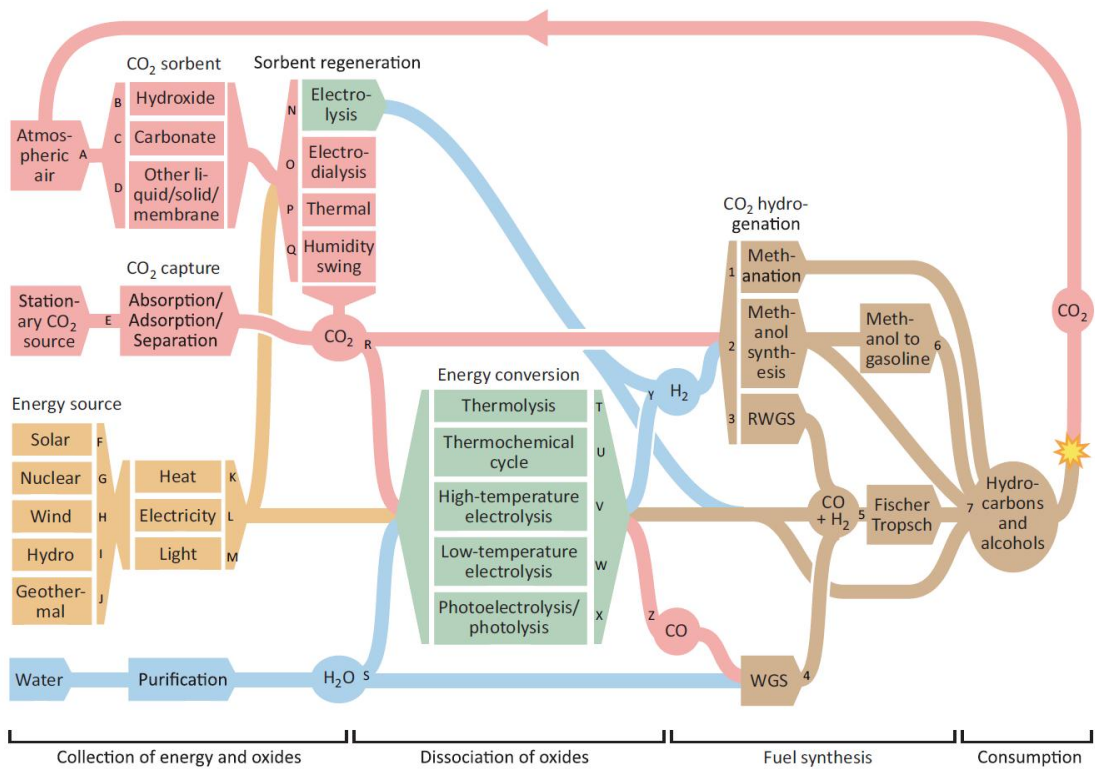
ceerd wordt, zodat er naar een stabiel evenwicht kan toegewerkt worden. Vancoillie et al. [9] bespreekt een well-to-tank analyse voor moderne vonkontstekingsmotoren speciaal ontwikkeld voor de brandstoffen waterstof en methanol in vergelijking met benzine. Methanol komt hier als meer dan interessant alternatief uit de bus wat betreft productiekost en mogelijk haalbare motorefficiëntie.

De benodigde  $\text{CO}_2$  voor het synthetiseren van methanol kan rechtstreeks uit de uitlaatgassen van grootschalige verbrandingsprocessen gehaald worden. Een andere optie is om deze koolstofbron uit de atmosfeer te halen. Beide mogelijkheden worden grafisch voorgesteld in figuur 2.1. De ideale situatie is dat de bron van hernieuwbare energie dicht bij een dergelijk industrieel proces gelokaliseerd is. Captatie uit de lucht garandeert dan weer locatie-onafhankelijkheid zoals benodigd is voor bijvoorbeeld zonne-energiewinning in woestijngebied.



Figuur 2.1:  $\text{CO}_2$ -captatie (bovenaan: uit industriële processen, onderaan: uit de atmosfeer) [1]

Iedere stap in deze synthetische methanolproductie kan met behulp van verschillende technieken uitgevoerd worden. Graves et al. [1] geeft een totaaloverzicht van deze diverse productiepaden gebaseerd op meerdere referentiewerken die deze individuele paden specifiek bestudeerden. Figuur 2.2 toont het resultaat van dit overzicht, met de mogelijke onderlinge connecties die vertrekken van de basiscomponenten water,  $\text{CO}_2$  en energie.



Figuur 2.2: Processen  $CO_2$ -captatie [1]

### 2.1.1 Collecteren van energie en oxides

Wat betreft de generatie van energie spreekt het voor zich dat de groene bronnen zoals wind- en zonne-energie het meest geschikt zijn voor gebruik in een hernieuwbare cyclus.

Het benodigde water kan theoretisch gezien uit de atmosfeer gehaald worden, maar wanneer voor een efficiënte en duurzame waterwinning gekozen wordt is ontzilten zee-water de beste optie. De kost van het ontzilten is beperkt in vergelijking met de eindkost van de brandstof [1].

Absorptie van  $CO_2$  uit de atmosfeer gebeurt typisch met behulp van hydroxide- of carbonaatoplossing. Hierbij wordt een afweging gemaakt tussen reactietijd (hydroxide sneller) en energie-input (carbonaat lager). Ook bestaat de mogelijkheid tot adsorptie op vaste stoffen.

Na absorptie of adsorptie dient het betreffende materiaal geregenereerd te worden om de gecapteerde  $CO_2$  vrij te geven en het materiaal te kunnen hergebruiken. De reeds gekende regeneratiemethodes bestaan uit electrolyse van de oplossingen of thermische verkalking van de carbonaten. Bij toepassing van elektrolyse wordt di-

rect ook het dissociatieproces gestart, met productie van waterstof en zuurstof. De integratie van beide processen is potentieel zeer energie-efficiënt. Gelijktijdige vrijgave van beide gasen bemoeilijkt dit echter aangezien er zo nog een gasfaseseparatie moet plaatsvinden. Een laatste veelbelovende technologie is deze van de 'humidity swing', ontwikkeld door dr. K. Lackner [1]. In plaats van een temperatuursvariatie wordt een variatie van vochtigheid toegepast op een vast adsorptiemateriaal om de CO<sub>2</sub> eerst te capteren en daarna terug vrij te geven. Voor dit proces wordt een reductie in energievraag met minimaal factor 8 geschat ten opzichte van de andere processen. Voor de standaard thermische captatiecyclus is 400-700 kJ per mol CO<sub>2</sub> nodig, voor electro-dialyse wordt 400 kJ/mol CO<sub>2</sub> geschat terwijl voor de methode met de vochtigheidsvariatie amper 50 kJ per mol gecapteerde CO<sub>2</sub> nodig is [10].

### 2.1.2 Dissociatie van oxides [1]

Het dissociatieproces omvat het grootste deel van het energieverbruik over de ganse productie van de brandstof gezien. Gedurende dit proces wordt immers de hernieuwbare energie in chemische vorm opgeslagen. De minimum vereiste hoeveelheid energie wordt gegeven door de enthalpie van volgende processen:



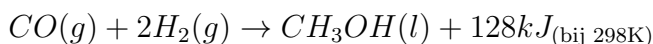
Deze energievraag kan ingevuld worden door zowel elektriciteit (lage en hoge temperatuurelektrolyse) als thermische energie (thermolyse en thermochemische cyclus). De combinatie van een elektrolysecel met een PV-paneel, genaamd fotoelektrolyse, integreert productie en verbruikproces van zonne-energie. Zo kan bespaard worden op investeringskost van het systeem, maar de beperking op het werkingsgebied van de foto-elektrode maakt dit systeem minder realiseerbaar.

Hoge temperatuurelektrolyse in vaste oxidecellen wordt aanzien als meest belovende in de huidige stand van de techniek. Op een verhoogde temperatuur verloopt de dissociatiereactie aan een hogere snelheid in vergelijking met de lage temperatuursvariant. Ook bestaat in dergelijke elektrolysecellen de mogelijkheid tot co-generatie van H<sub>2</sub> en CO, waardoor de componenten voor syngas in één stap geproduceerd worden. De verhoogde temperatuur en stroomdichtheden resulteren echter mogelijk in een versnelde slijtage van de elektrodes.

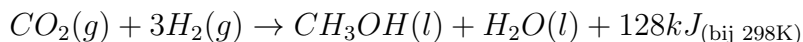


### 2.1.3 Brandstofsynthese

Indien er tijdens de dissociatiereactie nog geen bruikbare koolwaterstoffen werden gevormd, wordt met het bekomen syngas via Fischer-Tropschsynthese katalytisch methanol aangemaakt. Dit proces wordt al bijna een eeuw toegepast, er worden desalniettemin nog steeds rendementswinsten geboekt door ontwikkeling van verbeterde katalysatoren. De traditionele manier van methanolsynthese uit syngas is met een  $Cu/ZnO/Al_2O_3$ -katalysator op basis van de reactie:



Met eenzelfde katalysator is het ook mogelijk om rechtstreeks vanuit  $CO_2$  methanol te produceren:



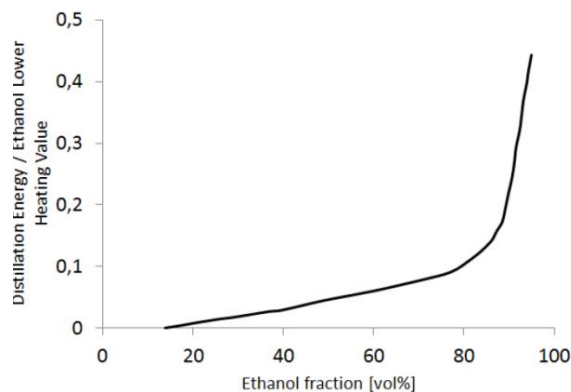
Pontzen et al. [11] past deze laatste reactie toe op een  $Cu/ZnO/Al_2O_3$ -katalysator die commercieel beschikbaar is en besluit dat hoewel het hydrogenatieproces van  $CO_2$  trager verloopt dan dat van  $CO$ , de selectiviteit hoger ligt en er minder bijproducten gegenereerd worden. Een ander besluit van dit werk was dat het via deze productieweg makkelijker is om uit de bekomen methanol DME (dimethylether) te maken. Dit is dan weer uiterst interessant met het oog op een methanoleconomie, waarbij DME als alternatief voor diesel kan gelden.

Verdere ontwikkelingen in katalysatoren pogen de selectiviteit en specifieke productie verder te verhogen, zoals bijvoorbeeld een aanpassing met  $ZrO_2$ . Fornero et al. [12] werkten zowel met een commercieel beschikbare  $Cu/ZnO/Al_2O_3$ -katalysator als met een zelfontwikkelde  $Ga_2O_3 - Pd/SiO_3$ -katalysator voor  $CO_2$ -captatie uit puntbronemissies (zoals industriële uitlaatgassen met verhoogde  $CO_2$  concentratie). Er kan geconcludeerd worden dat een  $CO_2$ -winning van 50% kan gehaald worden binnen de standaard gebruikte waarden van druk, temperatuur en recycle ratio van de niet-condenseerbare gassen. Bij verhogen van recycle ratio, druk en temperatuur kan in de limiet echter 100% bereikt worden. Wat betreft de nieuw ontwikkelde katalysator op Pd-basis wordt de selectiviteit echter niet verbeterd ten opzichte van de traditionele  $Cu/ZnO/Al_2O_3$ -katalysator.

## 2.2 Ethanol

Bioethanol wordt geproduceerd door microbiële fermentatie van suikers en zetmeelhoudende biomassa (graan, maïs, suikerriet/-bieten,...). Het productieproces wordt

gekenmerkt door een relatief grote energiekost bij het afscheiden van de laatste percentages water. Men kan op de conventionele manier destilleren tot een azeotroop mengsel met 95.63 vol% ethanol en 4.37 vol% water bekomen wordt. Om de resterende waterhoeveelheid te kunnen verwijderen moet men gebruik maken van andere processen die de totale energiekost enorm opdrijven, zie hiervoor ook figuur 2.3. Er wordt een exponentiële stijging waargenomen in de destillatie energie startend rond een zuiverheid van 80 vol% waterinhoud. Dit werd ook reeds aangehaald in de masterthesis van 2011-2012 [3], waarbij uit één literaire referentie besloten werd dat bij hoge toerentallen een beperkte hoeveelheid water in de brandstof een positief effect kan hebben op het effectieve rendement. Over het algemeen versterkt een verhoogde waterinhoud van de brandstof de negatieve aspecten van alcoholen (problemen bij koude start, BSFC). Ook wordt het voordeel van de verhoogde vlamsnelheid verminderd bij een stijgende waterconcentratie. Een voordeel van de aanwezigheid van water in de brandstof is de verlaagde vlamtemperatuur, wat zorgt voor een vermindering in productie van  $\text{NO}_x$ . Dit wordt dan echter weer gecompenseerd door de langere *light-off* tijd van de katalysator.



Figuur 2.3: Destillatie energie in functie van ethanolzuiverheid [13]

In dit opzicht geeft het recente werk van Breaux en Acharya [14] een interessante referentie en aanvulling. In dit onderzoek werden testen uitgevoerd in een swirl-gestabiliseerde verbrandingskamer op verbranding van ethanol met variërende waterinhoud. Er werd geconstateerd dat een stabiele vlam kan behouden worden tot een percentage water van 35 vol%. Daarna werd een nauwkeurigere meetset uitgevoerd tot 20 vol% water met brandstof-lucht equivalentieverhoudingen 0.6, 0.8, 1.0 en 1.1. Ook hier werd besloten dat een verhoogde waterinhoud leidt tot een lagere vlamtemperatuur en dus verminderde  $\text{NO}_x$ -emissies. De conclusie hier is dat het effectieve verbrandingsrendement zo goed als gelijk blijft en dat waterhoudende ethanol dus een economisch interessant alternatief is voor watervrije ethanol. Een over de ganse levenscyclus beschouwde energiewinst tot 25 % wordt gesuggereerd

voor een mengsel met 15 vol% water. Het betreft hier echter geen verbrandingsmotor maar een verbrandingskamer en er wordt dus geen rekening gehouden met de problemen bij koude start of actieradius van het voertuig. Ook wordt verondersteld dat een waterinhoud van meer dan 20 vol% een nefaste invloed zal hebben op de en de brandstofspray door het verhoogde debiet bij niet aangepaste injectoren, wat dus ook het rendement kan beïnvloeden.

Mack et al. [15] rapporteren over het ganse productieproces beschouwd een energiebesparing van 40 % bij toepassing van een mengsel bestaand uit 35 vol% ethanol en 65 vol% water. Bij gebruik op een HCCI (*Homogeneous Charge Compression Ignition*) motor met efficiënte warmterecuperatie wordt een stabiele werking bekomen tot 40 vol% waterinhoud. In Brazilië wordt reeds een waterhoudende ethanol commercieel aangeboden als E100, waarbij de waterinhoud tot 7,4 vol% mag bedragen. Deze brandstof had in de staat Sao Paulo<sup>1</sup> maart 2013 een competitief prijsvoordeel (op volumebasis) van 12 % ten opzichte van de gedehydrateerde ethanol. Een verdergaand experiment van Costa et al. [16] vergelijkt de prestaties van een ethanol-watermengsel met 6,8 vol% water met een in Brazilië standaard beschikbare E22 blend op een 1.0l 4 cilinder productiemotor. Er wordt een over het volledige snelheidsbereik verhoogd effectief rendement gerapporteerd met een maximale stijging van 14 %.

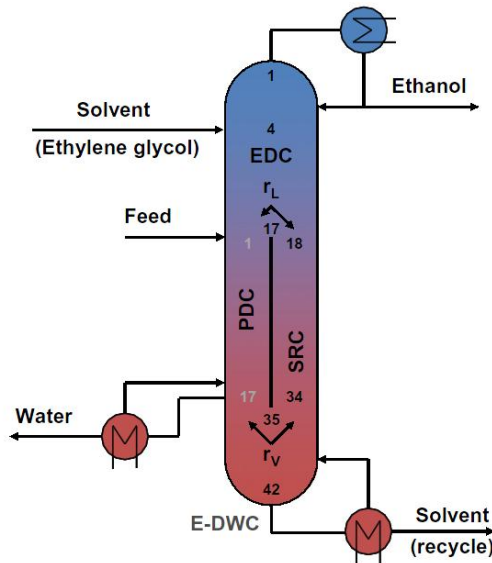
Gedurende dit academiejaar werd er voor het eerst ethanol ter beschikking gesteld voor experimenten na een lange procedure. In hoofdstuk 8 van het experimentele deel van deze masterthesis zullen enkele resultaten gepubliceerd worden die deze hypothesen verder kunnen doorgronden.

Traditioneel wordt echter geen rechtstreeks gebruik gemaakt van waterhoudende ethanol en dus is het duidelijk waarom in huidig onderzoek naar ethanolproductie voor verbrandingsmotoren de focus vooral ligt op het zo economisch mogelijk verwijderen van de laatste hoeveelheden water uit de brandstof. Er wordt vooral gewerkt op extractieve (met ethyleenglycol als solvent) en azeotrope (met cyclohexaan als solvent) destillatie in gescheiden-muur destillatiekolommen (*divided-wall columns - DWC*). Recentere technologische ontwikkelingen zoals drukschommelingsadsorptie (*pressure swing adsorption - PSA*) met behulp van moleculaire zeven tonen aan dat er nog wel degelijk potentieel is om de productiekosten van bioethanol te drukken, wat in de betreffende paragraaf verder wordt verduidelijkt.

---

<sup>1</sup>[www.unicadata.com.br](http://www.unicadata.com.br)

### 2.2.1 Eénstaps extractieve destillatie



Figuur 2.4: éénstaps destillatie [17]

Kiss en Ignat [17, 18] werkten aan een innovatief concept waarbij de drie destillatiestappen van het traditionele proces (pre-concentreren, extractieve destillatie en recyclage van oplosmiddel) geïntegreerd worden in één enkele stap (zie figuur 2.4). Met hun voorgestelde proces kan een zeer hoge ethanol concentratie van wel 99,8 % bekomen worden. Er wordt bespaard op investeringskosten aangezien er een herverhitter, twee condensers en uiteraard twee destillatiekolommen minder benodigd zijn. Het interessantste resultaat is echter dat er een vermindering in energieverbruik van 17 % kan gehaald worden door middel van deze technologie. Gezien het feit dat de destillatie één van de dominante kosten vertegenwoordigt in de totale productiekost van bioethanol, biedt dit resultaat een zeer mooi vooruitzicht.

### 2.2.2 PSA - *Pressure Swing Adsorption*

Dankzij materiaalkundige ontwikkelingen werd productie van hydrofiele moleculaire zeven mogelijk gemaakt. Zeolietenroosters met openingen van 3 Ångstrom adsorberen het water terwijl de koolwaterstofmoleculen in de vloeistoffase gehouden worden. De vloeistof-ethanoldamp wordt onder hoge druk in de reactor gebracht waarbij het water verwijderd wordt door adsorptie en de ethanoldamp onderaan de reactor geïncubateerd wordt. Na deze productiestap moet de reactor onder lage druk geregeereerd worden zodat het water verwijderd kan worden uit de zeolietstructuur. Dit

proces wordt drukschommelingsadsorptie (PSA) genoemd en kan een significante energiewinst voorstellen ten opzichte van de traditionele processen.

Jeong et al. [19] bestudeerden meerdere PSA processen waarbij de focus vooral ligt op het minimaliseren van het energieverbruik. Op een pilot plant werden volgende opties uitgetoet: de traditionele opstelling met twee reactoren, een multibuis reactor, tweestapsreactoren en drie reactoren. Vertrekkende van ongezuiverde ethanol met een ethanolconcentratie van 92.4 wt% wordt in de testreactor voor verschillende toevoerdebieten een watervrije ethanol met minimum zuiverheid van 99.5 % aangemaakt. De multibuisconfiguratie levert een significante energiewinst ten opzichte van de originele configuratie met twee reactoren. Het meest interessant voor grootschalige ethanolontwatering is echter de opstelling met drie reactoren, waarbij er een langere regeneratietijd is tijdens de continue werking van het proces. Dit geeft als voordeel dat het proces stabiel verloopt en de grootste opbrengst van watervrije ethanol kan noteren.

## Hoofdstuk 3

# On-board waterstofgeneratie

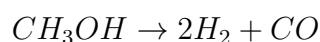
In het licht van de ontwikkeling van de brandstofcellen voor transporttoepassingen werd gezocht naar mogelijkheden tot generatie van waterstof aan boord van het voertuig. Dit aangezien de opslag en distributie van waterstof zoals gekend praktische problemen oplevert. In het kader van deze masterthesis is dit concept interessant aangezien het waterstofgas gebruikt kan worden als toevoeging aan de brandstof. De mogelijkheid tot sterk arme verbranding van  $H_2$  zorgt voor een significante verbetering van het deellastrendement en een sterke verlaging van  $NO_x$  en CO emissies [9]. De ontwikkeling van een plasmatron converter biedt hierbij een interessant alternatief voor de traditionele omzettingsreactoren.

### 3.1 Klassieke reactoren

In eerdere referentiewerken worden de mogelijkheden van verschillende brandstoffen en processen bestudeerd. Thermische decompositie, partiële oxidatie, stoom- en uitlaatgasreforming zijn de mogelijke processen voor omzetting van de brandstof naar een waterstofhoudend gas.

#### 3.1.1 Thermische decompositie

Thermische decompositie is het proces waarbij warmte op een gepaste temperatuur aan de brandstof toegevoerd wordt zodat deze brandstof ontbonden wordt in een waterstof- en koolstofhoudend gas. Voor methanol ziet deze reactie er als volgt uit:



Dergelijke productie van syngas is sterk endotherm (20 % van LHV van methanol [20]) en er is nood aan een katalysator om de reactie voldoende snel te doen verlopen.

Idealiter kan hiervoor de warmte uit de uitlaatgassen gerecupereerd worden, zie ook verder bij paragraaf 3.1.3 over uitlaatgasreforming.

### 3.1.2 Partiële oxidatie en stoomreforming

Bij partiële oxidatie wordt onder aanwezigheid van een kleine hoeveelheid lucht waterstof gegenereerd uit de brandstof. Deze reactie verloopt exotherm en aangezien het productgas op 870 °C staat dient het gekoeld te worden voor gebruik om het volumetrisch rendement niet te penaliseren.

Stoomreforming is het proces waarbij onder invloed van stoom toegevoegd aan de brandstof er waterstofgas en koolstofmonoxide of koolstofdioxide gevormd wordt. Bij lagere temperaturen (zoals die bereikbaar met uitlaatgaswarmte) is dit voor methanol voornamelijk CO<sub>2</sub>. De reactie kan dan als volgt voorgesteld worden:



Jamal en Wyszynsky [20] besloten dat een combinatie van partiële oxidatie en stoomreforming van methanol de beste werkwijze zou zijn, aangezien het ene proces een exotherm proces is en het andere endotherm. De warmte van het proces van partiële oxidatie kan dan in het endotherme proces met stoom gebruikt worden. Methanol blijkt de makkelijkste brandstof om een waterstofrijk gas te bekomen, maar de auteurs zagen in 1994 een probleem met infrastructuur en afwezige technologie voor methanolmotoren. Hun conclusie was dat een dergelijke brandstofverrijking een technologisch en economisch rendabel concept is dat ook toepasbaar is met benzine als brandstof.

Brown [21] bestudeerde enkele jaren later zeven relevante brandstoffen op hun potentieel voor gebruik in wagens aangedreven door waterstofbrandstofcellen. Naast direct gebruik van waterstof werden methanol, ethanol, benzine, diesel, aardgas en kerosine getest op de praktische omvormbaarheid tot waterstofgas. Er wordt ook hier geconcludeerd dat methanol de beste resultaten levert op basis van de gecombineerde processen van partiële oxidatie en stoomreforming. De meeste andere brandstoffen vereisen te grote en praktisch onbruikbare reactoren.

Het zeer recente onderzoek van Kirillov et al. [22] gaat hier verder op in. Een praktische realisatie van een dergelijk systeem wordt onderworpen aan verschillende tests die bevestigen dat het rendement in deellast (in een stadscyclus) sterk verbetert. Ook de verlaging in emissies van NO<sub>x</sub> en CO worden geconstateerd. De auteurs rapporteren ook een significante vermindering in de emissiewaarden van HC en CO<sub>2</sub>.

Een ander voordeel met groot potentieel, voor alcoholmotoren is een probleemloze koude start door de aanwezigheid van het waterstofgas in de brandstof.

### 3.1.3 Uitlaatgasreforming

Bij uitlaatgasreforming wordt de brandstof in direct contact gebracht met een portie van de hete uitlaatgassen en wordt op die manier hervormd. Dit proces is opnieuw het best realiseerbaar met methanol als brandstof aangezien de reacties bij lagere temperaturen gebeuren en er een lagere vorming van koolstofafzettingen is. [20]

Een licht verschillende optie wordt onderzocht in het werk van Tsolakakis en Megaritis [23], zij het dat in dit werk het concept werd toegepast op dieselmotoren. Er wordt in de EGR module een katalytische hervormer geplaatst die uitlaatgasreforming van de brandstof tot een waterstofhoudend gas bewerkstelligt. Dit waterstofrijke gas wordt dan toegevoegd aan de stroom van gerecycleerde uitlaatgassen, met als resultaat reformed EGR of REGR. Hoewel hier de focus van het onderzoek ligt op het verlengen van de gedeeltelijk voorgemengde verbranding bij dieselmotoren kan het gebruik van REGR bij aanwezigheid van een EGR systeem een handige manier zijn voor toevoeging van gegenereerd H<sub>2</sub>-houdend gas aan methanol of een gelijkaardige brandstof.

Met hervormd gas uit ethanol opgeslagen in gasflessen voerden Wheeler et al. [24] experimenten uit op een 5.4 L V8 motor. Dit gas bestaat uit volumetrisch gelijke delen van 33,3 % H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> en CO en is representatief voor het bekomen gas bij lage temperatuurshervorming (300 °C, maakt het mogelijk om de warmte van de uitlaatgassen aan te wenden) van ethanol. Bedoeling van het experiment was om een zo arm mogelijke verbranding te bekomen zonder de stabiele motorwerking te verstoren. Dit met behulp van een variabele nokkenastiming en in beperkte mate externe EGR. Drie verschillende brandstoffen werden getest: een mengsel van 50/50 hervormd gas en E85, benzine (98 RON) bij een compressieverhouding van 10:1 en E85 bij een hogere CR van 12:1. Voor het mengsel van hervormd gas en E85 wordt stabiele verbranding bekomen tot lambda 1.6 in 4 verschillende deellast werkpunten. Er wordt een stijging in BTE gerapporteerd van 10 tot 17 % t.o.v. de E85 bij gelijke CR en 20 tot 25 % t.o.v. de benzine bij CR van 10:1. Een piek van 41,1 % BTE bij 1500 tpm en 5,4 bar BMEP toont aan dat het mengsel van gas en E85 tot uitzonderlijke resultaten kan leiden. Een prototype hervormingsreactor werd getest maar nog niet duurzaam genoeg bevonden om een volledig experiment op uit te oefenen. Het probleem van koude start bij gebruik van alcoholen kan met behulp van deze techniek verholpen worden met een mengsel van minimum 50 vol% gas. Hierbij wordt een voldoende snelle light-off bekomen voor de TWC en kunnen significant lagere HC emissies gehaald worden.



## **3.2 Plasmatron convertoren**

Een plasmatron convertor ioniseert de brandstof gedeeltelijk door sterk gecontroleerde elektrische opwarming van deze brandstof. Met de beschikbare hoge temperaturen kan de vorming van waterstofrijk gas versneld worden zonder nood aan een katalysator. Op deze manier kunnen traditionele problemen als responstijd, werkbare temperatuursrange en brandstofsamenstelling vermeden worden. Het proces zelf is ook gebaseerd op de partiële oxidatie van de brandstof maar door de lokaal extreem hoge temperaturen worden radicalen gevormd die zorgen voor een boost in de productie van het gas.

Bromberg et al. [25, 26, 27] leverden hun bijdrage in dit vakgebied door meerdere brandstoffen te testen in een dergelijke plasmatron converter. Hoewel het meeste onderzoek in dit specifieke vakgebied gebeurt op methaan of propaan, concludeert Bromberg dat ook op biobrandstoffen zoals biodiesel en ethanol een goede werking kan bekomen worden.

Horng et al. [28] bevestigen met hun testen op een plasmatron converter het potentieel voor een emissiereductie gedurende koude start. Dit onderzoek werd uitgevoerd met CNG als brandstof en een 4-takt motor. In verder onderzoek werken de auteurs op een plasmakatalytische omzetter, een combinatie van beide beschikbare versies.

Een verdere ontwikkeling van deze plasmaconvertoren biedt een minder energievereisend proces, namelijk niet-thermische plasma's. Het plasma kan stabiel gehouden worden rond kamertemperatuur, terwijl de elektronentemperatuur kan oplopen tot 100.000 K. Petitpas et al. [29] maakten een samenvatting van verschillende uitvoeringen voor werking in brandstofcelvoertuigen op basis van verschillende brandstoffen. Er wordt gesteld dat een energiebesparing met factor 10 kan gerealiseerd worden ten opzichte van de traditionele plasmaconvertoren.

De ontwikkeling van plasmatron converteren heeft wel nog enkele drempels te overwinnen. Zo melden Horng et al. [28] een koolstofafzetting op de elektrodes van de plasmaconverter, wat de levensduur en waterstofopbrengst van de convertor niet ten goede komt. Ook op het gebied van vermogensvraag, gewicht en regeling is verder onderzoek vereist om een economisch rendabele werking te verkrijgen.

## Hoofdstuk 4

# Waarom (mengsels van) lichte alcoholen?

De laatste jaren wordt het meer en meer duidelijk dat alcoholen een veelbelovend alternatief zijn voor de huidige fossiele brandstoffen. Op dit moment wordt vooral ethanol het meest gebruikt. Zo is het gebruik van mengsels met 10 vol% ethanol (E10) in de Verenigde Staten al wijd verspreid, bevat standaard benzine 20-25 vol% ethanol in Brazilië en worden er in Europa ook meer en meer ethanol/benzinemengsels gebruikt (E5-E10). Niettegenstaande dat er ruim 25 miljoen flexfuel voertuigen rondrijden die capabel zijn om te rijden op E85 wordt slechts een klein deel van dit aantal effectief gevuld met het E85-mengsel. Hoewel ethanol tegenwoordig zo dominant is als alternatieve brandstof kunnen andere alcoholen misschien nog betere eigenschappen vertonen dan de huidige mengsels. In dit hoofdstuk volgt een vergelijkende studie van alcoholen (C1 - C8) en mengsels met alcoholen.

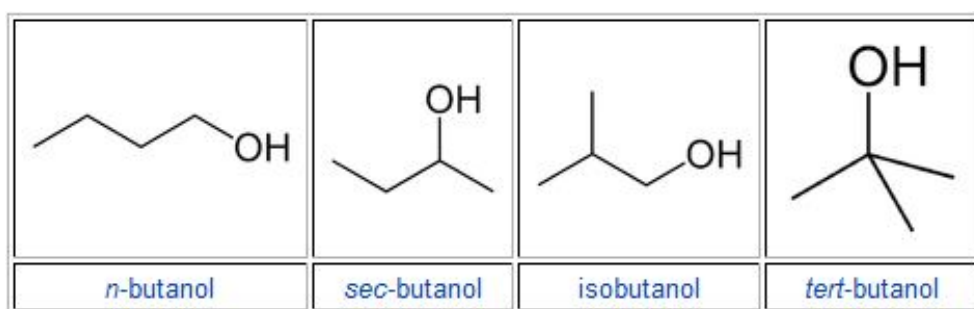
### 4.1 Algemeen

Tabel 4.1 toont een overzicht van de verschillende alcoholen van methanol (C1) t.e.m. octanol (C8). De alcoholen worden gekenmerkt door hun hydroxylgroep (-OH). Vanaf er drie koolstofatomen aanwezig zijn ontstaan er isomeren. Dit zijn moleculen met een zelfde chemische samenstelling, maar met verschillende structuren en plaatsing van de hydroxylgroep (figuur 4.1). De isomeer met een rechte keten koolstofatomen en de OH-groep op het einde wordt een n-isomeer of 1-isomeer genoemd (bv n-butanol of 1-butanol). De isomeer met een vertakte samenstelling en de OH-groep op het einde wordt voorafgegaan door 'iso' (bv. iso-butanol).

Het is een groot voordeel als alternatieve brandstoffen kunnen gebruikt worden in de hedendaagse vonkontstekingsmotoren zonder al te veel wijzigingen te doen aan de

Naam	C #	Mol. formule	Zuurstofgehalte [m%]
Methanol	1	CH <sub>4</sub> O	49.9
Ethanol	2	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O	34.7
Propanol	3	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O	26.6
Butanol	4	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O	21.6
Pentanol	5	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> O	18.1
Hexanol	6	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> O	15.7
Heptanol	7	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub> O	13.8
Octanol	8	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> O	12.3

Tabel 4.1: Overzicht alcoholen C1-C8



Figuur 4.1: Verschillende butanol isomeren

motorbestanddelen en aan het distributiesysteem. Indien men gaat kijken of hogere alcoholen beter geschikt zouden zijn, dan moeten deze alcoholen aan enkele specifieke eigenschappen voldoen. De vergelijkende studie van verschillende eigenschappen voor alcoholen (methanol t.e.m. octanol) werd uitgevoerd door Wallner et al. [30], waarbij de nadruk vooral lag op eigenschappen voor motorwerking en in feite niet het volledige plaatje werd bekeken (productieproces, beschikbare grondstoffen,...). Het is echter een van de weinige auteurs die deze hoogste alcoholen als mogelijk brandstofalternatief bespreken.

## 4.2 Eigenschappen van pure alcoholen

In deze paragraaf worden een viertal eigenschappen eruit gelicht om aan te tonen welke alcoholen nu het meeste potentieel hebben als toekomstige alternatieve brandstof. Ter vervollediging worden hierna de conclusies van de overige eigenschappen vermeld die door Wallner et al. [30] ruim besproken zijn geweest. Het grotendeel hiervan zal de gemaakte keuze verder rechtvaardigen.

### 4.2.1 Smelttemperatuur

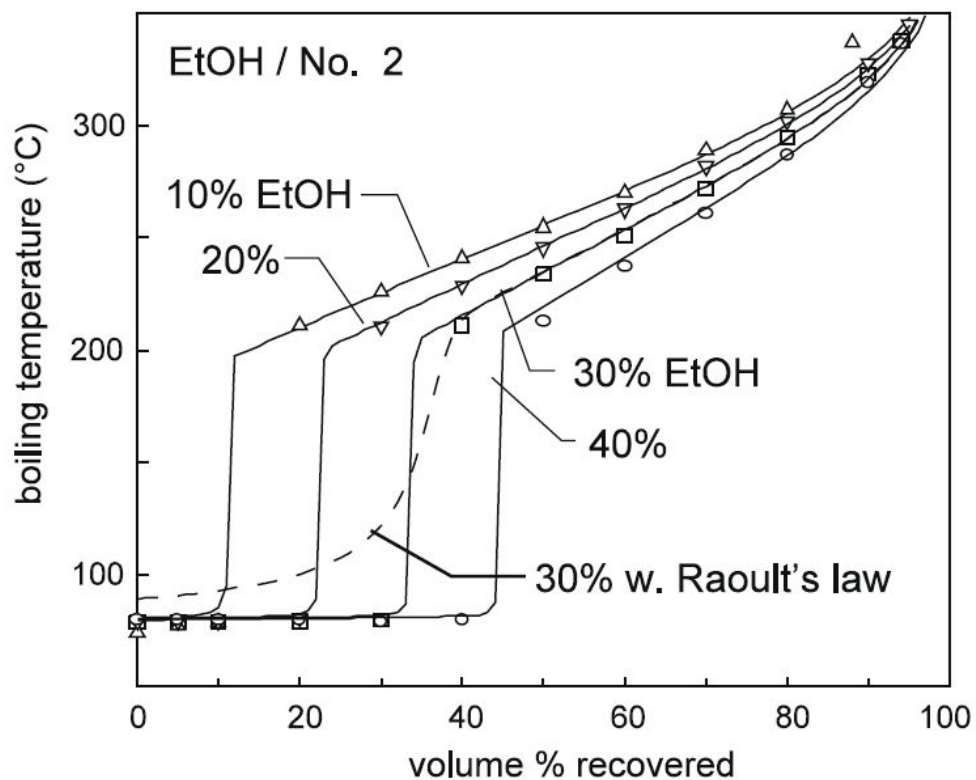
Een eerste en tevens voor de hand liggende vereiste is dat de brandstof in vloeibare vorm moet blijven. Enerzijds om een voldoende grote energiedichtheid te hebben ( $\leftrightarrow$  waterstofgas) en anderzijds om vlot door de leidingen getransporteerd te kunnen worden. Om zelfs in extreem koude weersomstandigheden geen problemen te veroorzaken moet de smelttemperatuur voldoende laag zijn ( $< -40^\circ\text{C}$ ). Hierdoor vallen al enkele mogelijkheden uit de boot waaronder de hogere alcoholen heptanol (C7) en octanol (C8). Tert-butanol en enkele isomeren van pentanol en hexanol vertonen ook een te hoge smelttemperatuur, waardoor deze niet geschikt zijn als alternatieve brandstof. Deze hogere smelttemperaturen zijn vooral te wijten aan de verlaagde intermoleculaire krachten (Londonkrachten, een onderdeel van de van der Waalskrachten), veroorzaakt door de verminderde polariteit van de hogere alcoholen en tert-isomeren. Op basis van deze eerste eigenschap ziet men reeds een eerste trend om de lichtere alcoholen te verkiezen.

### 4.2.2 Verdampingsgedrag

De volgende vereiste is een gepast verdampingsgedrag om een goede werking te verzekeren bij zowel een koude start als bij normale werking van de motor. Voor benzine brandstoffen voorziet de ASTM standaard D4814 enkele regels bij verschillende punten op de verdampingscurve. Zo moet er 10 vol% verdampt zijn bij een maximum van  $70^\circ\text{C}$  (T10), 50 vol% tussen  $77$  en  $121^\circ\text{C}$  (T50) en 90 vol% bij een maximum temperatuur van  $190^\circ\text{C}$  (T90). De benzine moet ten slotte volledig verdampt zijn wanneer de temperatuur  $225^\circ\text{C}$  bereikt is. Alcoholische brandstoffen verschillen hier echter fundamenteel, ze hebben namelijk een kookpunt i.p.v. een verdampingscurve. Deze vaste kookpuntwaarde zorgt ervoor dat men de verdampingscurve van pure benzine kan aanpassen door alcohol erbij te mengen. Hoe meer alcohol het mengsel bevat, hoe meer de curve zal verlengen ter hoogte van de kooktemperatuur. Men ziet eenvoudig in dat ter hoogte van het desbetreffende kookpunt zo goed als de volledige hoeveelheid alcohol wordt verdampt en zo de vorm van de totale verdampingscurve bepaalt.

Dit wordt geïllustreerd met de experimentele metingen van Aleme et al. [31] voor verschillende ethanol/benzinemengsels (E0 - E60) en de metingen van Hallett et al. [32] (figuur 4.2). Men ziet duidelijk dat er steeds een grotere hoeveelheid mengsel verdampt ter hoogte van het kookpunt van ethanol. Zoals men verwacht werden gelijkaardige trends vastgesteld voor andere alcoholen, zoals men kan zien in de experimentele database van Andersen et al. [33] voor benzinemengsels met methanol, ethanol, propanol en butanol. In hun studie vergeleken ze hun dataset met metingen van

verschillende andere auteurs en stelden hierbij zeer gelijklopende trends vast, weliswaar in functie van de gebruikte benzine. De verschillen zijn eenvoudig te verklaren door de pure benzine verdampingscurve met die van het alcohol/benzinemengsel te vergelijken. Hallett et al. [32] stelden ook vast dat voor ethanol/benzine mengsels de 'continuous thermodynamics simulation' een uitstekende voorspelling gaf voor de destillatiecurve. Men stelde ook vast dat de eenvoudigere wet van Raoult op basis van molaire fracties een sterk afwijkende voorspelling gaf voor de eerste helft van de verdampingscurve van de ethanol/benzinemengsels. De voornaamste reden voor deze afwijking is te vinden in het gebruik van een 'activity coefficient' bij hun simulatie in tegenstelling tot het gebruik van molfracties bij de wet van Raoult. Deze wet bepaalt in feite de eigenschappen van een perfecte menging van verschillende componenten, de gebruikte (*activity*) coëfficiënten brengen de afwijkingen t.o.v. een perfecte menging in rekening en zorgen bijgevolg voor een uitstekende voorspelling. Een meer gedetailleerde uitleg over deze simulatiemethode met aangepaste coëfficiënten kan men o.a. vinden in de paper van Vakili-Nezhaad et al. [34]



Figuur 4.2: Destillatiecurve voor verschillende mengsels benzine/ethanol [32]

Andersen et al. [33] onderzochten ook de invloed op de verdampingscurve wanneer met twee alcohol componenten gewerkt wordt. Ze stelden vast dat de curve minder wijzigde met twee maal 10 vol% van verschillende alcoholen, dan het geval van

benzine met 20 vol% van één alcohol. In alle opgemeten mengsels lag het dubbel alcoholmengsel steeds tussen de curves van de enkele alcohol mengsels. Uiteindelijk testte men de opgemeten (enkele en dubbele) alcoholmengsels aan de opgelegde ASTM D4814 norm. Ter hoogte van de T50-vereiste stelden ze vast dat voor mengsels met een grotere hoeveelheid lichte alcoholen (bv. >E10) er aanpassingen zouden moeten gedaan worden aan de kalibratie van de huidige motoren. De kooktemperatuur van de lichte alcoholen zorgt er namelijk voor dat de T50-waarde van de oorspronkelijke benzine zal verlaagd worden. Hierdoor zal de helft van het mengsel al verdampen bij een lagere temperatuur. In warme landen kan dit uiteindelijk leiden tot *'vapor lock'* problemen. De ternaire (= dubbele alcohol) mengsels die later zullen besproken worden (Sectie 4.4), bieden hierbij misschien een oplossing. De mengsels met 50 vol% (*'mid-levels'*) propanol en butanol leveren minder problemen op.

Aangezien de T90-vereiste slechts een maximum is en alle alcoholen deze waarde verlagen, levert dit geen extra problemen op. De T10-vereiste is echter nog belangrijker voor een goede motorwerking. Het moet voldoende laag zijn om er voor te zorgen dat bij een koude start er voldoende brandstof verdampt om de motor te kunnen starten. De invloed op deze T10-waarde wordt pas vastgesteld vanaf bepaalde alcoholhoeveelheden en levert dus pas problemen op bij alcohol/benzinemengsels met een hoog alcoholgehalte. Om deze problemen te omzeilen bij E85-mengsels, zal men gebruik maken van een benzine met een hogere vluchtigheid dan de standaard benzine aan de pomp. De problemen voor de T10-vereiste bij de propanol en butanol isomeren zijn zelfs nog groter. Om deze problemen te verhelpen stelden de auteurs een drietal oplossingen voor:

- Een aangepaste benzine met verhoogde vluchtigheid en aanpassen van het alcohol gehalte volgens het seizoen
- Wijzigingen aan de kalibratie van de motoren om aangepast te zijn aan deze gewijzigde destillatiecurven, wat ook gedaan wordt bij het ontwerpen van flexfuel motoren
- Een tweede opslagtank met een brandstof (bv. pure benzine) om te gebruiken tijdens de koude start

Het is duidelijk dat men zal streven naar het gebruik van de eerste twee oplossingen en liever niet een tweede vloeistof gebruikt, wat het totale systeem een stuk complexer en meer ruimte innemend maakt. Desalniettemin werd dit laatste systeem toch gebruikt in bepaalde Braziliaanse flexfuel voertuigen die werken op waterhoudende ethanol om de problemen bij een koude start te verhelpen. Recent werden er

echter wagens gelanceerd op de Braziliaanse markt die het kleine extra reservoir vervangen door een aangepast startsysteem (bv. on-board brandstofomvorming, hoofdstuk 3) die in koude atmosferomstandigheden de brandstof gaat voorverwarmen om de verdamping te garanderen. Een gedetailleerder overzicht van de mogelijkheden om problemen bij een koude start te voorkomen, kan me vinden in een voorgaande thesis [5].

Een aanpassing aan de gebruikte ASTM-standaarden voor pure benzine lijkt ook aangewezen indien men in de toekomst vaker grotere alcoholgehaltes in de mengsels zal gebruiken (ASTM D5798 voor het E85-mengsel is hier een uitstekend voorbeeld bij).

### 4.2.3 Vluchtigheid

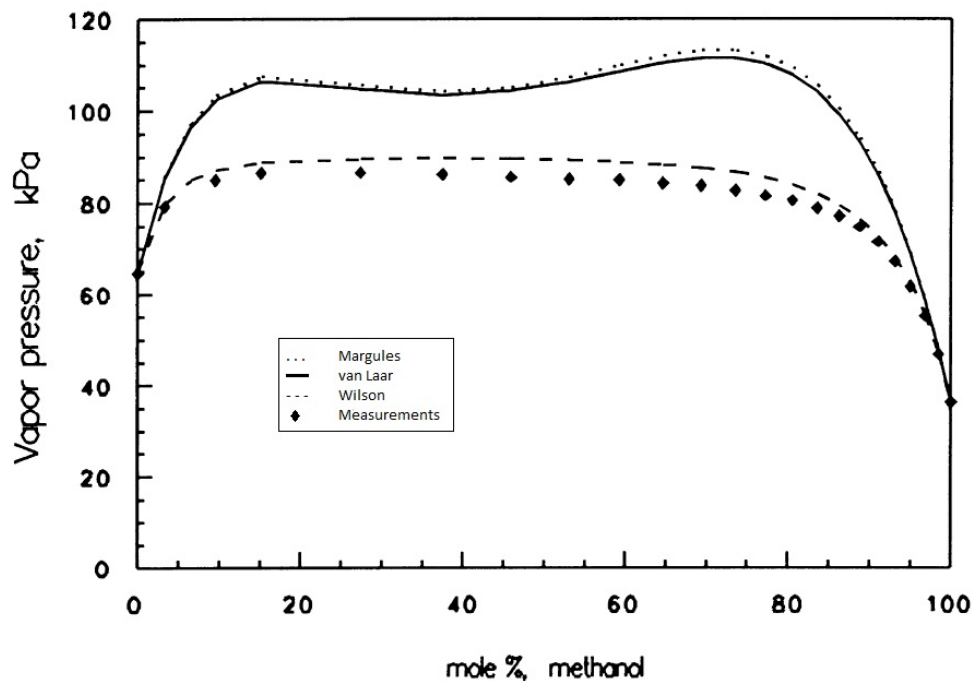
Een eigenschap die nauw aanleunt bij het vorige is de vluchtigheid ('*volatility*') van de brandstof die uitgedrukt wordt als de dampdruk. De ASTM-standaard D4814 voorziet een maximale dampdrukwaarde van 53.8 tot 62.1 kPa voor benzine-brandstoffen, afhankelijk van welk geografisch gebied men zich in bevindt. Voor ethanol/benzinemengsels geldt een maximum van 69 kPa voor de dampdruk. Een te hoge dampdrukwaarde leidt tot verhoogde evaporatieve emissies, dit zijn emissies afkomstig van het verdampen van de brandstof in de brandstoftank zelf. Deze dampen komen echter niet rechtstreeks in de atmosfeer terecht, maar gaan naar een opslagsysteem met actieve koolstof. Ze worden dan op bepaalde ogenblikken tijdens het rijden meegevoerd naar de motor, door het opslagsysteem te doorstromen met lucht. Een te lage dampdrukwaarde resulteert dan weer in problemen bij een koude start waarbij er te weinig vluchtige brandstofdeeltjes zijn om de motor te kunnen starten. Wallner et al. bepaalden de dampdruk van enkele alcoholen<sup>1</sup> en stelden een stijgende waarde vast voor de dampdruk met dalend koolstofgehalte. Zo vallen de hexanol en pentanol isomeren ook zo goed als af met hun te lage RVP-waarden (*Reid Vapor Pressure*, dampdruk).

Hoewel methanol ( $\pm 32$  kPa) en ethanol ( $<26$  kPa) een beduidend lagere RVP-waarde hebben dan benzine, vertonen (m)ethanol/benzinemengsels een opvallende stijging van deze waarde voor niet te hoge hoeveelheden alcohol in het mengsel. Dit verschijnsel loopt samen met het azeotrope gedrag van deze lichte alcohol/benzinemengsels. Bij een stijgende alcoholhoeveelheid zal de RVP-waarde van het mengsel terug beginnen dalen en uiteindelijk de waarde van het pure alcohol aannemen. Pumphrey et al. [35] onderzochten dit fenomeen en stelden vast dat

---

<sup>1</sup> Standard Test Method or Vapor Pressure of Petroleum Products (Mini Method) volgens ASTM 5191, kookpunt moet boven  $0^{\circ}\text{C}$  zijn en RVP tussen 7 en 130 kPa op  $37.8^{\circ}\text{C}$

er een soort van plateau wordt gevormd in de RVP-waarde (86 kPa voor methanol/benzine en 71 kPa voor ethanol/benzine). Men merkt op dat de waarden tot E15 nog aanvaardbaar zijn volgens de ASTM standaard, maar dat dan een bepaald gebied van ethanolpercentages licht ongeschikt lijkt te zijn. Methanol daarentegen bereikt al zeer snel de grens van de opgelegde maximale dampdrukwaarde wat zal leiden tot verhoogde evaporatieve emissies. Indien de hoeveelheden ontsnapte gassen beperkt zijn, vormt dit niet direct een probleem voor het tijdelijke opslagsysteem dat zeer efficiënt blijkt te zijn voor evaporatieve emissies. De auteurs deden deze metingen om een model te ontwerpen dat dampdrukwaarden kan voorspellen voor alcohol/benzinemengsels. Ze stelden hierbij vast dat de vergelijking van Wilson (wederom gebaseerd op 'activity coefficients') de beste voorspelling gaf, terwijl andere simulatiemethodes (Margules en van Laar) grote afwijkingen vertoonden ten opzichte van de experimentele waarden (zie fig. 4.3 voor methanol).



Figuur 4.3: RVP methanol/benzine mengsel i.f.v. methanol mol% [35]

#### 4.2.4 Energie-inhoud

Uit de voorgaande eigenschappen blijkt de keuze te gaan naar de lichtere alcoholen, er zijn echter ook eigenschappen die gunstiger worden met toenemend koolstofaantal. De meest gekende eigenschap hierbij is de massa specifieke energiewaarde (*Lower Heating Value*, LHV). Terwijl benzine een energiewaarde heeft van 42-43 MJ/kg, bezitten ethanol (26 MJ/kg) en methanol (20 MJ/kg) hier slechts een fractie van.



Propanol en butanol doen het weliswaar iets beter, maar zelfs deze laatste heeft nog een reductie tot 23% in massa specifieke energiewaarde ten opzichte van benzine.

In een standaard vonkontstekingsmotor wordt de hoeveelheid brandstof en bijgevolg de energiewaarde geregeld met de injectieduur. Hierdoor is het interessanter om te kijken naar een volumetrische energie-inhoud (uitgedrukt in MJ/l) dan naar een LHV-waarde (uitgedrukt in MJ/kg). Aangezien de alcoholen ( $>0.790$  kg/l) een verhoogde dichtheid vertonen ten opzichte van benzine ( $\pm 0.740$  kg/l) wordt de energie reductie ten opzichte van benzine wat minder uitgesproken. Zo heeft methanol (15.9 MJ/l) nog een vermindering van 50% op benzine (31.6 MJ/l) en ethanol (21.3 MJ/l) ruim 30%. Voor butanol is dit nog slechts 14%. In de literatuur en in het bijzonder in voorgaande thesissen [5, 3] stelt men ook een hoger rendement vast voor de lichtste alcoholen, waardoor het verschil in benodigde brandstofhoeveelheid met benzine nog meer vermindert.

Indien men nu ook de stoichiometrische AFR (*Air to Fuel Ratio*) erbij haalt waarvan men eenvoudig de waarde kan bepalen voor elke alcohol via de chemische verbrandingsformule, dan stelt men een stijgende waarde vast met toenemend koolstofgehalte van methanol ( $\pm 6.4$ ) tot butanol ( $\pm 12$ ). Allen een stuk lager dan de AFR-waarde van benzine ( $\pm 14.6$ ). Indien men nu naast de dichtheid ook de AFR-waarde doorrekent op de massa specifieke energie-inhoud, dan bekomt men de '*mixture calorific value*' uitgedrukt in MJ/m<sup>3</sup>. Deze waarde stelt de energie-inhoud van een bepaald stoichiometrisch lucht/brandstofmengsel voor. Deze waarde bedraagt 3.5 MJ/m<sup>3</sup> voor benzine, terwijl deze waarde iets hoger ligt voor alcoholen. Voor butanol vindt men een waarde van 3.55 MJ/m<sup>3</sup> terug, 3.6 MJ/m<sup>3</sup> voor ethanol en zelfs 3.7 MJ/m<sup>3</sup> voor methanol. Stelt men nu dat de rendementen constant blijven bij de verschillende brandstoffen, dan vertaalt deze hogere '*mixture calorific value*' zich onmiddellijk in een verhoging van de koppelwaarde en bijgevolg ook in een verhoging van het vermogen.

Zo zorgen de lichtste alcoholen enerzijds voor een hoger volumetrisch brandstofverbruik (uitgedrukt in *Brake Specific Fuel Consumption* [g/ekWh], BSFC) en bijgevolg ook een verminderde actieradius ten opzichte van benzine. Anderzijds leiden ze wel tot een stijging qua vermogen en rendement ten opzichte van benzine in eenzelfde motor.

#### 4.2.5 Overige eigenschappen en conclusie

Wallner et al. [30] brachten nog enkele andere eigenschappen van alcoholen bijeen in hun paper, waarmee de wereldwijde keuze voor onderzoek naar lichte alcoholen (methanol t.e.m. butanol) gerechtvaardigd blijkt te zijn. Hierna volgt een kort

overzicht van de gunstige eigenschappen voor lichte alcoholen ten opzichte van de zwaardere alcoholen:

- + Een lager smeltpunt
- + Een hogere dampdrukwaarde
- + Een hogere '*mixture calorific value*'
- + Een lagere AFR-waarde door het hogere zuurstofgehalte ('*pre-mixed oxygen effect*')
- + Een stijgende latente verdampingswarmte bij afnemend koolstofgehalte. De energie nodig om 1 kg methanol (ca. 1150 kJ) te verdampen is bijna viermaal zoveel als er nodig is bij benzine (ca. 300 kJ). Men kan deze eigenschap ook omvormen naar een latente verdampingswaarde per eenheid energie. Deze eigenschap toont de grootte van het koelend effect van de brandstof in de cilinder. Dit effect is vooral van belang bij het gebruik van directe injectie en kan de kloppersistentie gevoelig doen verhogen. Men ziet dat deze waarde bij alcoholen een veelvoud zijn van deze van benzine: bv. methanol (x8), ethanol (x5) en butanol (x3). Het koelend effect kan ook leiden tot een dichtheitsstijging en bijgevolg tot de mogelijkheid om meer brandstof/luchtmassa (= energiehoeveelheid) in de cilinder te brengen.
- + Gelijklopend met de vorige eigenschap vertonen de lichtste alcoholen ook een verhoogde RON (en MON)waarde die wat daalt voor de hogere alcoholen. Deze maatstaf voor kloppersistentie is kwantitatief echter wat achterhaald daar de meetmethodes (voetnoot: RON ASTM D2699 en MON ASTM D2700) niet aangepast zijn voor de alcoholen(mengsels). Zo is de RON-waarde van de referentie brandstof slechts 100 en dus lager dan die van de alcoholen. Ook is de CFR motor waarop de testen worden uitgevoerd niet geschikt om de grote AFR verschillen met benzine op te vangen. De RON- en MON-waarden zijn echter wel nog een uitstekende eigenschap om trends waar te nemen.
- + Een hogere laminaire vlamsnelheid werd vastgesteld voor de lichtste alcoholen t.o.v. benzine, deze snelheden dalen licht met toenemend koolstofgehalte. Over vlamsnelheden voor de hoogste alcoholen is er amper data beschikbaar en bijgevolg ook geen trends.
- + Lichte alcoholen vertonen ook wat bredere ontstekingsgrenzen dan benzine, die weliswaar versmallen met toenemend koolstofgehalte. Dit kan gunstig zijn om eventueel een arm brandstof/luchtmengsel te gebruiken als werkingsstrategie, zoals onderzocht in een voorgaande thesis [5]

Gevolgd door de eigenschappen die gunstiger zijn voor zwaardere alcoholen:

- De lichtere alcoholen hebben een verlaagde (volumetrische en massa specifieke) energie-inhoud die stijgt met toenemend koolstofgehalte
- Methanol en ethanol vertonen volledige oplosbaarheid in water, terwijl vanaf butanol deze oplosbaarheid zo goed als volledig verdwijnt. Dit geeft enkele nadelige gevolgen (bv. transport door pijpleidingen) die verder worden besproken in hoofdstuk 7.

### 4.3 Lichte alcoholen

Uit het vorige is het meer dan duidelijk dat de vier lichtste alcoholen grote voordelen vertonen tegenover hogere alcoholen. Deze trend zien we dan ook wereldwijd terug bij de vele onderzoeksgroepen die hierop werken. Ook in het openbaar zijn het de lichte alcoholen die meer en meer komen boven drijven als veelbelovend en vooral hernieuwbaar alternatief voor de fossiele brandstoffen. Zo werd het aandeel van ethanol al vermeld in het inleidend gedeelte van dit hoofdstuk. Hiernaast wordt ook methanol meer en meer onderzocht en zal waarschijnlijk in de (nabije) toekomst zijn aandeel op de brandstofmarkt zien vergroten.

Propanol (C<sub>3</sub>) wordt dan weer opvallend weinig beschouwd als brandstof voor wagens. Het wordt wel vaak gebruikt als solvent in de organische chemie of als schoonmaakmiddel. Samen met het feit dat het productieproces een stuk moeilijker is dan bijvoorbeeld bij ethanol en bijgevolg ook energie-intensiever en kostelijker, zorgt dit ervoor dat de keuze gaat naar het gebruik als solvent i.p.v. als brandstof. Eén van de moeilijkheden bij het proces is hoogstwaarschijnlijk de destillatie, daar de kooktemperatuur van (n-)propanol (97.1°C) zeer dicht ligt bij deze van water. Het is dan ook eerder plausibel dat men isopropanol (met de hoogste RON-waarde [30]) eerder als additief zal gebruiken dan als alleenstaande brandstof.

Butanol daarentegen wordt de laatste jaren meer en meer onderzocht en naar voor geschoven als hernieuwbare brandstof, dit vooral door de recente verbeteringen in de productieprocessen. Net als propanol is dit alcohol met vier koolstofatomen fundamenteel verschillend van methanol en ethanol, aangezien de structuur van de molecule in verschillende molaire structuren kan voorkomen. Butanol kan voorkomen in vier verschillende isomeren, namelijk 1-butanol (of n-butanol), sec-butanol, iso-butanol en tert-butanol. Hun eigenschappen staan opgesomd in tabel 4.2. Wat onmiddellijk opvalt is de hoge kooktemperatuur van tert-butanol waardoor het ongeschikt is om als brandstofalternatief te gebruiken. Het moet ook opgemerkt worden dat de butanol die geproduceerd wordt uit biomassa via fermentatieprocessen vooral

de isomeer is met de lange keten en de hydroxylgroep (-OH) op het einde, 1-butanol of n-butanol genoemd.

Een vergelijkende studie tussen deze drie lichte alcoholen dringt zich dus op, zowel in hun pure vorm als in mengsels met benzine. Recent werd een deel van deze literaire studie uitgevoerd door Jin et al. [36] die het potentieel van bio-butanol onderzochten als alternatieve brandstof voor zowel benzine- als dieselmotoren. Hierbij werd butanol vergeleken met conventionele benzine en diesel, alsook met de hernieuwbare brandstoffen methanol, ethanol en bio-diesel. Voor deze thesis beperken we dit tot de conclusies voor de drie alcoholen ten opzichte van benzine in vonkontstekingsmotoren. Na een overzicht van de voor- en nadelen van butanol ten opzichte van methanol en ethanol, volgt een conclusie over welk alcohol er eventueel boven de rest uitsteekt.

#### 4.3.1 Voordelen butanol t.o.v. methanol en ethanol

Op basis van fysische en chemische eigenschappen (tabel 4.3) besluit men dat butanol enkele tekortkomingen van de lichtere alcoholen methanol en ethanol zou kunnen verhelpen. Zoals al eerder besproken (paragraaf 4.2.4) is één van de grote voordelen de hogere LHV-waarde en densiteit van butanol, wat onmiddellijk gevolg heeft op een betere actieradius van de wagen ten opzichte van (m)ethanol [30, 37, 38].

Een lagere vluchtigheid (RVP-waarde) zorgt dan weer voor verminderde evaporatieve emissies, hoewel deze waarde ook niet te laag mag liggen om problemen te vermijden bij een koude start. Butanol bezit echter twee andere eigenschappen om deze startproblemen net te vermijden, namelijk een lagere verdampingswaarde en een lagere zelfontstekingstemperatuur. Een hoge verdampingswaarde heeft uiteraard ook zijn voordelen, aangezien het zorgt voor een koelingseffect in de cilinder dat o.a. een lagere cilindertemperatuur als gevolg heeft en hierdoor kan zorgen voor

	<i>1-butanol</i>	<i>sec-butanol</i>	<i>tert-butanol</i>	<i>iso-butanol</i>
Densiteit [kg/m <sup>3</sup> ]	809.9	806.3	788.7	801.8
RON-getal	96	101	105	113
MON-getal	78	32	89	94
Smelttemperatuur [°C]	-89.5	-114.7	25.7	-108
Kooktemperatuur [°C]	117.7	99.5	82.4	108
Verdampingsenthalpie [kJ/kg]	582	551	527	566
Zelfontstekingstemp. [°C]	343	406.1	447.8	415.6
Viscositeit bij 25°C [MPa s]	2.544	3.096	-	4.312

Tabel 4.2: Eigenschappen van butanol isomeren

een mogelijke verlaging van de  $\text{NO}_x$ -emissies.

Het eerder apolaire gedrag van butanol (ten opzichte van het polaire methanol en ethanol) zorgt ervoor dat de kans geringer is om faseseparatie te veroorzaken in mengsels met benzine. Deze faseseparatie (zie Hoofdstuk 7) veroorzaakt een degradatie van de brandstof door transfer van alcohol van de brandstoffase naar de waterfase. De verminderde watertolerantie heeft ook tot gevolg dat er zich minder problemen stellen bij de distributie van butanol via pijpleidingen dan bijvoorbeeld bij ethanol (zie Hoofdstuk 7). Het hoge vlamptpunt (*'flash point'*) van butanol zorgt er dan weer voor dat dit een veiligere brandstof is om te gebruiken bij hogere temperaturen dan benzine en in mindere mate ook dan (m)ethanol.

Dernotte et al. [39] concludeerden dan weer uit hun testen dat butanol de COV wat verlaagt en dus de verbranding stabiliseert. Dit wordt echter tegengesproken in de paper van Wallner et al. [40] die geen significante verschillen vaststelden tussen een B10-mengsel en benzine. Men kan dit verschil deels verklaren doordat Wallner et al. gebruik heeft gemaakt van een motor met directe injectie die het gedrag van de COV duidelijk beïnvloedt, terwijl Dernotte et al. [39] gebruik maakte van een motor met PFI waarbij de invloed van butanol waarschijnlijk de bovenhand haalde.

### 4.3.2 Nadelen butanol t.o.v. methanol en ethanol

Butanol bezit uiteraard ook enkele nadelen ten opzichte van de lichtere alcoholen methanol en ethanol, waaronder een hogere viscositeit die mogelijk voor problemen kan zorgen bij de injectoren van benzinemotoren. Dit probleem werd echter nergens expliciet vermeld in de overige literatuur. Een ander nadeel is de lagere RON-waarde van butanol ten opzichte van de grote klopresistentie van (m)ethanol. Deze hoge klopresistentie zorgt ervoor dat deze lichtste alcoholen kunnen gebruikt worden met een verhoogde compressieverhouding en de bijhorende hogere effectieve rendementen. Een verhoogd rendement zorgt dan op zijn beurt weer voor verbeterde specifieke emissies en  $\text{CO}_2$ -uitstoot.

Verder zorgt een hoger zuurstofgehalte van ethanol en nog meer van methanol ervoor dat de verbranding completer zal zijn. Dit leidt onmiddellijk tot de conclusie dat de CO-emissies lager zullen liggen dan bij butanol [39, 37] en dit vooral bij arme mengsels ( $\lambda > 1$ ). Bij stoichiometrische mengsels zijn er weinig verschillen merkbaar van CO-emissies tussen pure benzine en ethanol/benzine of butanol/benzine mengsels [39, 40]. De emissies van onverbrande koolwaterstoffen zijn ook een stuk lager en dit door de vollediger verbranding bij toenemend gehalte aan zuurstof [38, 37]. Bij lagere hoeveelheden butanol en ethanol werden echter nog geen significante verbeteringen vastgesteld [40].

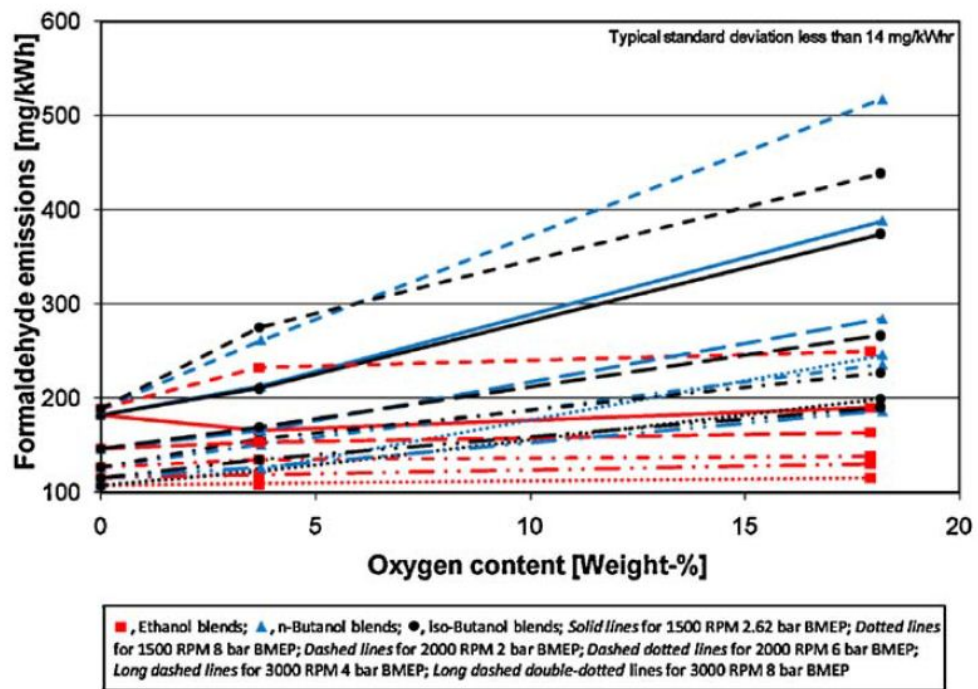
	<b>Benzine</b>	<b>Methanol</b>	<b>Ethanol</b>	<b><i>n</i>-butanol</b>
Moleculaire formule	C <sub>4</sub> -C <sub>12</sub>	CH <sub>4</sub> O	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O
RON-getal	80-99	111	108	96
Zuurstofgehalte [m%]	-	50	34.8	21.6
Densiteit bij 20°C [kg/m <sup>3</sup> ]	720-780	796	790	808
Zelfontstekingstemperatuur [°C]	~ 300	470	434	385
Vlampunt [°C]	-45 à -38	12	8	35
LHV-waarde [MJ/kg]	42.7	19.9	26.8	33.1
Kookpunt [°C]	25-215	64.5	78.4	117.7
Stoichiometrische AFR	14.6	6.5	9.0	11.2
Latente verdampingswarmte [kJ/kg]	380-500	1109	904	582
Ontvlambaarheidsgrenzen [vol%]	0.6-8	6.0-36.5	4.3-19	1.4-11.2
Viscositeit bij 25°C [MPa s]	2.544	3.096	-	4.312

Tabel 4.3: Eigenschappen van lichte alcoholen t.o.v. benzine [36]

Het ontstaan van NO<sub>x</sub> bij de verbranding is een complex proces en is vooral afhankelijk van de temperatuur, de zuurstofconcentratie en de verblijfstijd in de cilinder. Door het koelend effect van de lichtste alcoholen dankzij een hogere latente verdampingswarmte en een lagere adiabate vlamtemperatuur, verwacht men dus verlaagde NO<sub>x</sub>-emissies ten opzichte van benzine. Dit effect is het grootst voor methanol, gevolgd door ethanol en butanol en men verwacht dit dan ook terug te zien in testresultaten. In de literatuur ontbreekt echter een vergelijkende studie van specifieke NO<sub>x</sub>-emissies voor de drie alcoholen op een zelfde, of op z'n minst een gelijkaardige, proefstand. De vergelijking tussen ethanol en butanol is echter wel uitgevoerd en Broustail et al. [38] stelden vast dat ethanol lagere waarden vertoonde dan butanol. Wallner et al. [40] onderzocht een E10-mengsel ten opzichte van een B10-mengsel en zij stelden dan weer een lagere waarde vast voor butanol. Deze uitkomst kan men wat verklaren doordat de ontstekingstiming voor ethanol vroeger kon gebeuren dan voor butanol (dat zelf verlaat werd ten opzichte van benzine) door het verschil in kloppersistentie. Ook testen met methanol [5, 3] bevestigden dat er een significante verbetering was in NO<sub>x</sub>-emissies ten opzichte van benzine.

Wallner et al. [41] onderzochten in een vervolgstudie ook niet-gereguleerde emissies van ethanol- en butanolmengsels. Voor de uitstoot van formaldehyde stelde men bij ethanol vast dat er geen significante verschillen waren ten opzichte van benzine. De uitstoot van acetaldehyde vertoonde wel een stijgende trend met toenemend ethanolgehalte zoals algemeen beschreven staat in de literatuur. Voor butanol werd wel een duidelijke stijging vastgesteld bij de uitstoot van formaldehyde met toenemend butanolgehalte (figuur 4.4). De hoogste waarden werden vastgesteld bij de laagste belasting, terwijl de laagste waarden werden vastgesteld bij hoogste belasting onaf-

hankelijk van het toerental. De acetaldehyde-uitstoot was dan weer gelijkaardig met ethanol en vertoonde ook een stijgende trend met toenemend butanolgehalte. Deze trends qua formaldehyde- en acetaldehydewaarden van butanol en ethanol werden ook in de paper van Broustaill et al. [38] bevestigd. De uitstoot van formaldehyde is ook een bekend struikelblok voor methanol en wordt wat uitgebreider besproken in hoofdstuk 7. Deze trends van de aldehyden-uitstoot wijzen er op dat het gebruik van butanol en methanol bij lage belasting (bv. in een stadsomgeving) een significante stijging in deze toxische stoffen kan veroorzaken ten opzichte van ethanolmengsels.



Figuur 4.4: Formaldehyde uitstoot van verschillende ethanol- en butanol-benzine mengsels [36]

### 4.3.3 Conclusie lichte alcoholen

Uit het vorige is het duidelijk dat deze drie alcoholen elk over verschillende voordelen beschikken tegenover de fossiele brandstoffen. Butanol is hierbij het meest gelijkaardig aan benzine, waardoor het onmiddellijk als een *'drop-in fuel'* kan gebruikt worden net zoals E10-mengsels nu al wereldwijd gebruikt worden. Hiernaast kan butanol, net zoals methanol, ook dienen als bouwsteen voor een variëteit aan brandstoffen en kan zo helpen het aandeel van de fossiele brandstoffen te verkleinen [42]. Methanol en ethanol hebben dan wel een lagere energie-inhoud, maar ze bezitten ook een hogere klopressistentie waarbij de compressieverhouding kan verhoogd worden wat dan leidt tot een verhoogd rendement en verlaagde specifieke

emissies. Zoals men merkt is er niet één perfect alternatief dat boven de overige uittoert. Hierbij moet uiteraard ook vermeld worden dat de productiemogelijkheden en -wijzen een zeer belangrijke bijkomende invloed hebben in de zoektocht naar de meest duurzame oplossing. Enkele productiemogelijkheden voor methanol en ethanol werden reeds besproken in voorgaande thesissen [5, 3] en aangevuld in hoofdstuk 2 van deze masterscriptie. Voor de productie van butanol werden recent ook vernieuwende technieken toegepast bij de fermentatie van biomassa (zoals genetische manipulatie). Samen met het feit dat butanol uit een uitgebreider aanbod biomassa kan geproduceerd worden, zorgen de verbeterde productietechnieken ervoor dat deze bio-butanol een waardig concurrent wordt van bio-ethanol. Een verdergaande studie naar de verschillende productieprocessen van butanol zou ons echter te ver weg leiden van het hoofddoel en onderwerp van deze thesis.

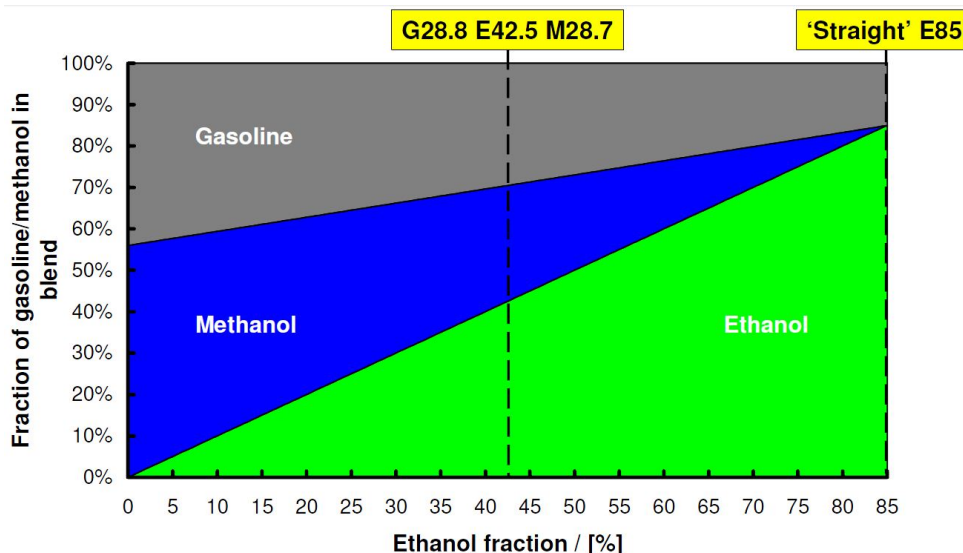
#### 4.4 Ternaire mengsels

Uiteraard kan men het best de voordelen van lichte alcoholen zoals methanol en ethanol uitbuiten door ze in hun pure vorm te gebruiken. Zo kan men ten volle genieten van hun voordelen ten opzichte van benzine. Zoals al vooraf gezegd in deze thesis, is een overschakeling van benzine naar bijvoorbeeld methanol niet mogelijk in één dag tijd. Zo'n overschakeling zal moeten gebeuren in tussenstappen en dan hoogst waarschijnlijk wel in de vorm van mengsels van alcoholen met benzine. De meest gebruikte binaire mengsels tegenwoordig zijn degene die ethanol en benzine bevatten, zoals een E5- of een E85-mengsel.

De huidige evolutie naar het gebruik van steeds groter wordende hoeveelheden van deze mengsels lijken echter te stuiten op de zogenaamde 'biomassalimiet'. Dit is het bekende dilemma waarbij men moet kiezen hoeveel grond men wil gebruiken om producten te kweken voor ethanol, wetende dat deze grond dan niet meer kan genuttigd worden voor het telen van voedingsproducten voor mens en dier. Methanol kan echter geproduceerd worden uit veel verschillende biomassabronnen en kan zelfs synthetisch geproduceerd worden uit gecapteerde CO<sub>2</sub> en waterstof (zie hoofdstuk 2). Het feit dat zowel methanol als ethanol mengbaar zijn met benzine, alsook onderling mengbaar, leidde bij Turner et al. [7] tot het idee om ternaire mengsels te gebruiken met benzine, methanol en ethanol. Hun drang om zoveel mogelijk hernieuwbare brandstof te gebruiken en de eis om hun GEM-mengsels ('*Gasoline-Ethanol-Methanol*') te kunnen gebruiken in de huidige flexfuel voertuigen leidden tot de hypothese om mengsels te gebruiken die isostoichiometrisch zijn met E85. Wat dus wil zeggen dat deze mengsels een gelijke AFR-waarde vertonen. Deze waarde is echter wat afhankelijk van de gebruikte benzine en bedraagt ongeveer 9,7 [7]. Het concept is dat men start met een E85-mengsel en een bepaalde hoeveelheid



ethanol hieruit gaat vervangen door een methanol/benzine mengsel waarbij de AFR-waarde constant blijft (zie figuur 4.5). De gebruikte componenten met enkele van hun eigenschappen staan opgelijst in tabel 4.4, waarbij een typische benzine met octaangetal 95 is gebruikt.



Figuur 4.5: Ternair diagram van GEM-mengsels [7]

Het onderzoek naar zulke isostoichiometrische mengsels is echter enkel nuttig indien er voldoende flexfuel voertuigen rond rijden of tenminste in de komende jaren op de markt zullen komen. De verschillende mengsels moeten uiteraard ook 'onzichtbaar' zijn voor het motormanagement systeem, zodat deze denkt dat er E85 getankt is geweest. De invloed van de verschillende flexfuelsensoren hierbij zal in het volgende hoofdstuk 5 uitgebreider worden besproken. De invloeden op fysische en chemische eigenschappen worden in dit hoofdstuk van dichterbij bekeken.

In de gebruikte paper van Turner et al. [7] worden vier isostoichiometrische mengsels vergeleken met elkaar. Het eerste is uiteraard een E85-mengsel (G15 E85 M0) dat als referentie dient voor de testen. Het tweede is het equivalent hiervan waarbij enkel benzine en methanol wordt gebruikt, namelijk 44 vol% benzine met 56 vol%

Brandstof component	Stoich. AFR	LHV [MJ/kg]	Densiteit [kg/l]	MM [g/mol]
Benzine	14.53	42.7	0.736	114.56
Ethanol	8.60	26.8	0.789	46
Methanol	6.44	19.9	0.7913	32

Tabel 4.4: Eigenschappen van componenten van GEM-mengsels [7]

methanol (M56 of G44 E0 M56). De samenstelling van dit laatste mengsel kan zoals verwacht nog licht wijzigen, afhankelijk van de gebruikte benzine.

Hierbij komt E85 overeen met mengsel A in de testen en M56 met mengsel D. De twee overige GEM-mengsels zijn gekozen op basis van hun hoeveelheid ethanol, waarbij respectievelijk voor mengsel B en C het volumepercentage ethanol gedeeld werd door twee en door vier. Samengevat zijn de volgende vier samenstellingen onderzocht:

- Mengsel A: G15 E85 M0
- Mengsel B: G29.5 E42.5 M28
- Mengsel C: G37 E21 M42
- Mengsel D: G44 E0 M56

#### 4.4.1 **Berekende eigenschappen: AFR-waarde, LHV en latente verdampingswarmte**

In appendix B zijn vergelijkingen opgesteld om enkele eigenschappen van de ternaire mengsels te kunnen berekenen. Indien men ze toepast op de vier mengsels bekomt men tabel 4.5. Het is duidelijk dat de vier verschillende mengsels slechts geringe afwijkingen vertonen ten opzichte van E85. Men herkent echter de volgende lichte trends met toenemend volumepercentage methanol:

- De lagere dichtheid van methanol t.o.v. ethanol zorgt voor een (zo goed als) lineaire daling van de dichtheid van het mengsel
- Een toename van het methanolgehalte zorgt automatisch ook voor een toename van het benzinegehalte, wat leidt tot een lichte verhoging van de gravimetrische LHV. Het verschil in dichtheid nivelleert dan wel uiteindelijk de belangrijkere volumetrische energie-inhoud
- Het lagere koolstofpercentage in methanol zorgt voor een dalende koolstofintensiteit, wat kan leiden tot verminderde CO<sub>2</sub>-uitstoot bij een ongewijzigd rendement

De dichtheid werd hierbij opgemeten bij 15°C<sup>2</sup> en men merkt hierbij op dat de meest extreme mengsels A en D slechts een relatieve afwijking van 2% vertonen.

Daar Turner et al. [7, 43, 44] pioniers zijn op het vlak van deze ternaire (GEM-)mengsels is het niet mogelijk om hun resultaten te vergelijken met andere auteurs.

---

<sup>2</sup>volgens ASTM D86

Brandstof/Mengsel	Benzine	A	B	C	D
GEM componenten	G100	G15	G29.5	G37	G44
	E0	E85	E42.5	E21	E0
	M0	M0	M28	M42	M56
Stoich. AFR	14.18	9.69	9.69	9.71	9.69
Densiteit [kg/l]	0.731	0.781	0.773	0.769	0.765
Grav. LHV [MJ/kg]	43.12	29.09	29.38	29.56	29.66
Vol. LHV [MJ/l]	31.52	22.71	22.70	22.71	22.69
C intensiteit [gCO <sub>2</sub> /l]	2297.3	1627.9	1624.2	1623.9	1620.2
C intensiteit [gCO <sub>2</sub> /MJ]	72.88	71.69	71.56	71.49	71.41

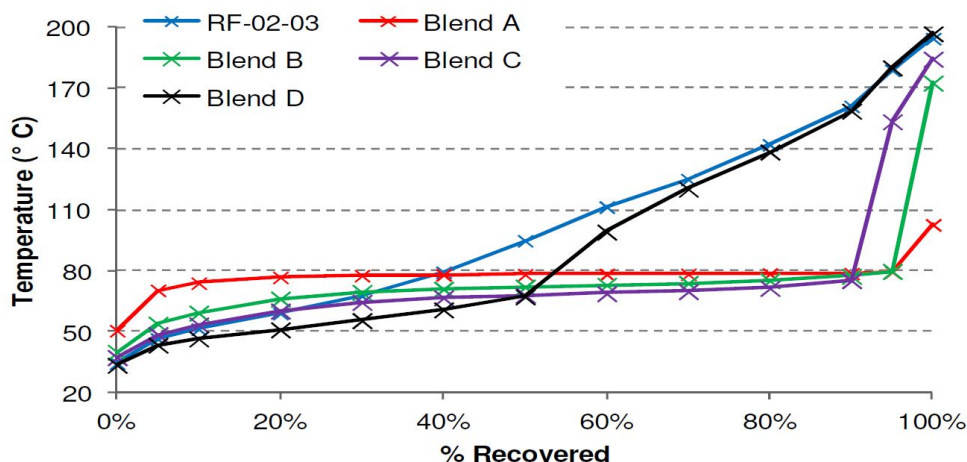
Tabel 4.5: Eigenschappen van isostoichiometrische E85-mengsels [7]

In wat volgt worden dus enkele van hun uitkomsten besproken ten opzichte van de bevindingen in de vorige secties van dit hoofdstuk. Zo zullen de verdampingscurve, dampdrukwaarde, klopresistentie, emissies en prestaties aan bod komen. Hiernaast wordt er ook extra aandacht geschonken aan de fasestabiliteit van deze mengsels.

#### 4.4.2 Destillatiecurve

Zoals in paragraaf 4.2.2 reeds vermeld heeft benzine een zekere destillatiecurve die moet voldoen aan een ASTM-standaard. Alcoholen daarentegen bezitten een vast kookpunt en kunnen bijgevolg de vorm van de mengseldestillatiecurve sterk gaan beïnvloeden. Op figuur 4.6 ziet men de vier opgemeten destillatiecurven voor de testmengsels, waarbij 'RF-02-03' een standaard benzine voorstelt. Zoals beschreven door Aleme et al. [31] en Hallett et al. [32] wordt de curve sterk verlengd ter hoogte van het kookpunt van de ethanol en verhoogt de invloed met stijgend ethanolgehalte. Bij het E85-mengsel ziet men inderdaad een horizontale die ongeveer 85% van het gerecupereerd volume inneemt. Met stijgend methanol gehalte daalt de invloed van ethanol en nadert de curve in het begin en op het eind naar de benzinecurve. Bij het mengsel C en vooral bij mengsel D ziet men de duidelijke invloed van methanol, waarbij de horizontale nu eerder ter hoogte van het methanol kookpunt ligt. Deze verlaging van de curve zorgt ervoor dat in het begin van de destillatie de mengselcurve onder degene van benzine ligt, waar de mengselcurve met een hoger ethanolgehalte er boven ligt. Deze verminderde vluchtigheid is de reden waarom E85-mengsels soms last hebben om te starten bij te lage temperaturen. Dit probleem wordt tegenwoordig verholpen door in de wintermaanden het ethanolpercentage te verlagen naar ongeveer E70, hierbij zorgt de benzine dan voor voldoende vluchtige bestanddelen om de motor vlot te doen starten. Dit resultaat betekent dan ook dat een M56-mengsel minder last zou hebben om een koude start uit te

voeren dan een E85-mengsel, losstaand van andere omstandigheden zoals mogelijke fase-separatie.



Figuur 4.6: Distillatiecurve ternaire GEM-mengsels [7]

#### 4.4.3 Vluchtigheid

De dampdruk is een indicator voor de aanwezigheid van lichte fracties in een mengsel die reeds verdampen bij lage temperaturen. Het azeotrope gedrag van ethanol/benzine mengsels zal er voor zorgen dat deze RVP-waarde wat stijgt in het gebied van lage ethanolpercentages. Bij hogere ethanolmengsels zal de invloed van de hoofdcomponent de overhand nemen en bijgevolg heeft het E85-mengsel een bedeutend lagere waarde dan benzine (tabel 4.6). Deze waarde zal stijgen naargelang men grotere hoeveelheden ethanol vervangt door methanol/benzine mengsel. Voor mengsel C en D ziet men zelfs een dampdruk waarde die hoger ligt dan bij benzine. Er is echter een maximum vooropgesteld van 62.1 kPa (ASTM D4814) voor pure benzine en 69 kPa voor ethanol/benzinemengsels. Huidige opslagsystemen voor evaporatieve emissies blijken uiterst efficiënt te zijn, waardoor er geen problemen zouden mogen zijn voor het E85-mengsel en de overige isostoichiometrische alternatieven. Deze hypothese is echter nog niet specifiek onderzocht geweest, doch werden geen problemen hieromtrent vastgesteld tijdens de testen. Indien het toch voor een probleem zou zorgen kan men dit uiteraard oplossen door bv. additieven toe te voegen die de vluchtigheid verlagen. Merk hierbij ook de tegenstrijdigheid op met de wens naar een hogere vluchtigheid bij het starten onder koude temperatuur omstandigheden.

Een belangrijke opmerking gemaakt door Turner et al. [7] is dat de stijging in dampdruk waarde veel nadrukkelijker is bij isostoichiometrische mengsels van E15. Daar

steeg de waarde met toenemende methanol inhoud tot 87 kPa, een heel stuk hoger dan de 72 kPa van het C- en D-mengsel. Deze vaststelling en de opgemeten hoge waarde komen heel goed overeen met de plateauwaarde die terug te vinden is bij de metingen van Pumphrey et al. [35] voor de binaire methanol/benzinemengsels. Hierdoor kan men verwachten dat er weinig problemen voor het starten bij lage temperaturen zullen voorkomen. Men voorziet echter wel problemen bij te hoge omgevingstemperaturen en in het bijzonder bij de mengsels met een bepaalde hoeveelheid methanol. De zeer hoge dampdrukwaarde zou er namelijk kunnen voor zorgen dat het opslagsysteem voor evaporatieve emissies verzadigd geraakt en dat er bijgevolg onaanvaardbaar grote emissies ontstaan.

#### 4.4.4 Octaangetal en klopresistentie

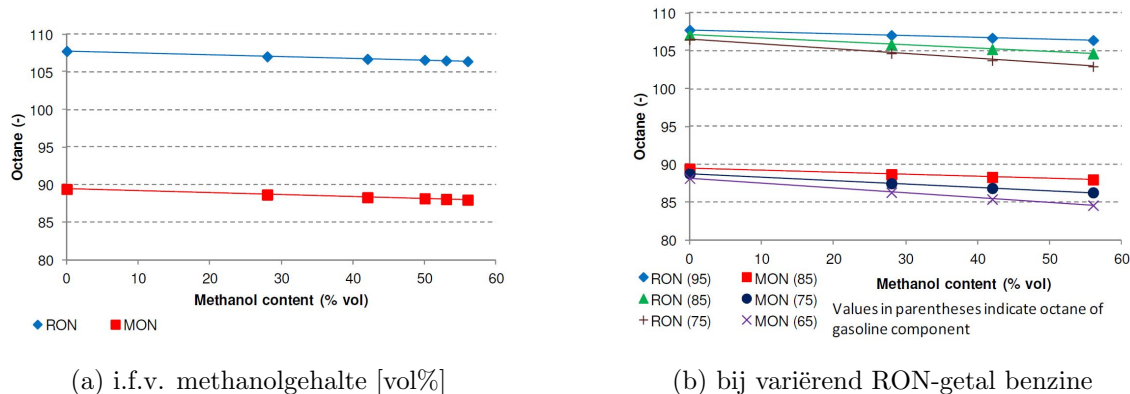
De verhoogde klopresistentie is een uitstekende eigenschap van alcoholen die de mogelijkheid schenkt om de efficiëntie te kunnen verhogen. Nu blijken GEM-mengsels hieromtrent een opvallende eigenschap [7] te vertonen, het octaangetal bleek namelijk zo goed als constant over de vier geteste mengsels. Dit fenomeen is echter nog maar vastgesteld door Turner et al. en vereist dus nog verder onderzoek om deze hypothese te bevestigen. Dit uiteraard met de bedenkingen over de RON/MON-test van alcoholische brandstoffen (paragraaf 4.2.5) in het achterhoofd.

Anderson et al. [45] stelden vast dat men het octaangetal best kon voorspellen aan de hand van correlaties op basis van molaire fracties. Figuur 4.7 toont het octaangetal voor de verschillende geteste GEM-mengsels, berekend met de moleculaire correlatie. Men ziet slechts een zeer kleine daling voor zowel het RON- als MON-getal met een verhoogd methanolgehalte (figuur 4.7a) en dit komt dus grotendeels overeen met de experimentele vaststelling van een constante RON-waarde. Indien men additieven zou moeten toevoegen (bv. voor een lagere volatiliteit) zullen deze getallen hoogstwaarschijnlijk iets lager liggen. Ook heeft men de invloed van de gebruikte benzine in de mengsels getest. Dit gaf als resultaat dat hoe lager het octaangetal van de benzine, hoe groter het effect was van de daling van het RON-

Mengsel	Benzine	E85 isostoichiometrisch				E15 isostoichiometrisch			
		A	B	C	D				
		G15	G29.5	G37	G44	G85	G87.5	G88.5	G90
		E85	E42.5	E21	E0	E15	E7.5	E4	E0
		M0	M28	M42	M56	M0	M5	M7.5	M10
RVP [kPa]	65	40	61	72	72	71	78	83	87

Tabel 4.6: Dampdrukwaarde isostoichiometrische E85- en E15-mengsels [43]

en MON-getal met toenemend methanol gehalte (figuur 4.7b). Dit resultaat was te verwachten aangezien bij stijgend methanolgehalte ook het percentage benzine meestijgt en hierbij ook zijn invloed op de klopresistentie. Ook de dalende hoeveelheid totaal alcoholgehalte en de bijhorende vermindering in koelend effect helpt mee aan de daling van het octaangetal. Zelfs met de minst goede benzine bleek het octaangetal echter voldoende en nog steeds een stuk hoger dan de pure benzine te zitten. Dit zou dus weinig invloed mogen hebben op het gedrag van een flexfuel motor.



Figuur 4.7: Octaangetal bij isostoichiometrische E85-mengsels

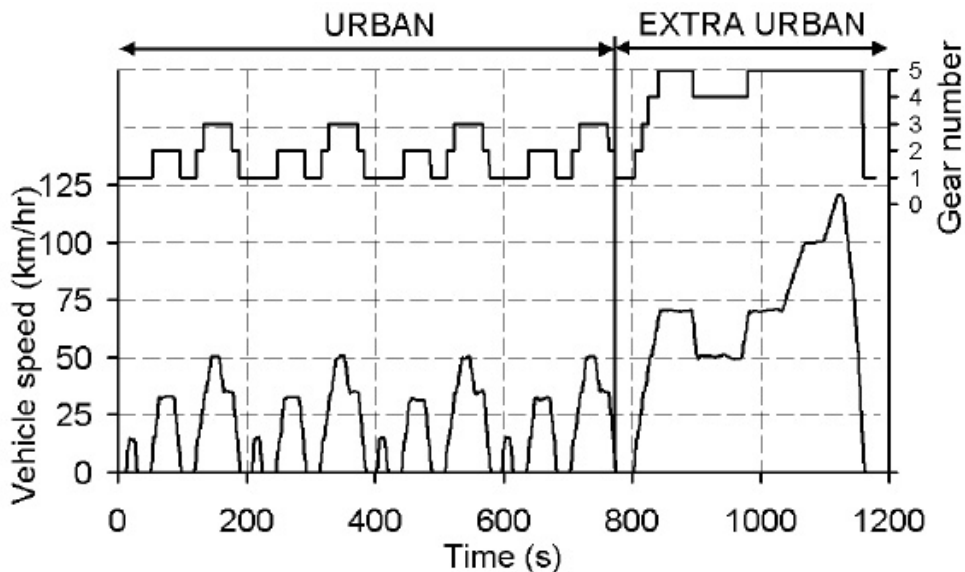
#### 4.4.5 Prestaties en emissies

Naast de brandstofeigenschappen hebben Turner et al. [7, 43] ook het gevolg voor de prestaties en emissies van de GEM-mengsels getest. Hiervoor maakten ze gebruik van een Saab 9<sup>3</sup> 1.8t BioPower wagen, waarop zowel koude als warme NEDC-testen gedaan werden<sup>3</sup>.

De resultaten kunnen als volgt samengevat worden:

- De CO<sub>2</sub>-uitstoot was een stuk lager gelegen dan bij benzine. Met een toenemend gehalte methanol steeg deze waarde dan ook door de samengaan- de stijging van benzinegehalte en bijhorende hogere koolstof-intensiteit.
- Gemiddeld is het (volumetrisch) brandstofgebruik ten opzichte van benzine 27.2% hoger bij de koude testen en 24.5% bij de warme testen. Aangezien de volumetrische energie inhoud van de vier mengsels gemiddeld 31.8% lager ligt dan de gebruikte benzine bevestigt dit het feit dat de alcoholen een positieve invloed hebben op het rendement van de motor.
- HC emissie waarden kwamen ook overeen met die van benzine, nadat ze werden gecorrigeerd (volgens OudeNijeweme et al. [43]). De NMHC emissies lagen wel

<sup>3</sup>NEDC = New European Driving Cycle, figuur 4.8



Figuur 4.8: New European Driving Cycle

iets lager dan bij benzine. Het feit dat de totale HC emissies gelijk zijn met die van benzine, is waarschijnlijk te verklaren door een verhoogd gehalte niet-verbrande alcoholen in de uitlaat.

- Het koelend effect van de alcoholen zorgde ervoor dat de  $\text{NO}_x$ -emissies ruim onder de waarden van benzine lagen.

Hierbij moeten er echter nog enkele opmerkingen gegeven worden. De resultaten van Turner et al. [7, 43] lijken te leiden tot de conclusie dat hun isostoichiometrische mengsels inderdaad 'onzichtbaar' zijn voor de flexfuelmotor. De motor merkt inderdaad niet dat er een alternatief mengsel gebruikt wordt, de waarden van de eigenschappen variëren slechts weinig voor de vier testmengsels en ze gaven telkens gelijkaardige resultaten weer voor alle prestatie- en emissietesten. De NEDC-testen geven echter resultaten voor de emissies NA de katalysator. Om beter te kunnen inschatten en begrijpen wat nu de gevolgen zijn van de variërende methanol- en ethanolpercentages moet men testen uitvoeren waarbij de emissies gemeten worden aan de uitgang van de motor, dus VOOR de katalysator. Zo kan men pas de hypothese bevestigen dat alle isostoichiometrische mengsels inderdaad volledig gelijkwaardig zijn en dat er bijvoorbeeld geen sterke trends aanwezig zijn met toenemend methanol- of ethanolgehalte.

#### 4.4.6 Stabiliteit

Ten slotte bekijken we de stabiliteit van de isostoichiometrische mengsels die vereist is om een volwaardig alternatief te kunnen zijn voor E85. Turner et al. [43] onderwierp hiervoor de vier mengsels aan bepaalde testen om zowel de oxidatiestabiliteit<sup>4</sup> als het ontstaan van wasachtige substanties<sup>5</sup> te controleren. Er bleken geen negatieve invloeden te zijn van de toegevoegde (m)ethanol op deze eigenschappen.

Qi et al. [46] onderzocht in 2005 methanol/benzine mengsels waarbij ethanol als co-solvent werd gebruikt. Ze bepaalden hoeveel ethanol moest toegevoegd worden aan het mengsel om er voor te zorgen dat het niet meer separeerde bij realistische omgevingsvoorwaarden. De enige standaard om fase-separatie (zie Hoofdstuk 7) te onderzoeken bij alcohol/benzine mengsels<sup>6</sup> is teruggetrokken in 2007 door gebrek aan precisie en consistentie bij de testen. Hierdoor werd deze eigenschap door Turner et al. [43] getest op een alternatieve manier: 100ml van het mengsel werd 24 uur lang bij  $-18^{\circ}\text{C}$  bewaard en nadien werd visueel gecontroleerd op sporen van fase-separatie. Alle mengsels die een bepaalde hoeveelheid ethanol bevatten bleven stabiel, in tegenstelling tot het mengsel D dat sporen van separatie vertoonde. Dit kwam dus overeen met de bevindingen van Qi et al. [46]. Een onderzoek naar welk minimaal percentage ethanol voldoende is om de separatie te voorkomen bij een vooropgestelde temperatuur ontbreekt echter nog.

In 1981 deed Skinner et al. [47] reeds onderzoek naar de stabiliteit van alcohol/benzinemengsel bij een bepaalde temperatuur, wanneer men kleine hoeveelheden water ging toevoegen. Ze stelden vast dat het optreden van fase-separatie niet enkel temperatuur afhankelijk was. Het type alcohol, de hoeveelheid water en de alcohol/benzine ratio spelen ook een belangrijke rol hierbij. Deze watertolerantie werd ook getest door Turner et al. (figuur 4.9). De testtemperaturen gingen helaas maar tot  $10^{\circ}\text{C}$ , waardoor er dus geen resultaten bekend zijn bij reële wintervoorwaarden. Men ziet wel duidelijk de invloed van het ethanolgehalte, daar het A-mengsel de hoogste tolerantie heeft. Hoe meer ethanol wordt vervangen door methanol/benzine, hoe lager de tolerantie wordt. Men stelt ook de te verwachten dalende trend voor watertolerantie vast met afnemende temperaturen. Deze watertolerantie heeft ook zijn gevolgen voor het transport en de distributie van deze brandstoffen. Problemen hieromtrent, samen met materiaalcompatibiliteit, worden verder toegelicht in hoofdstuk 7.

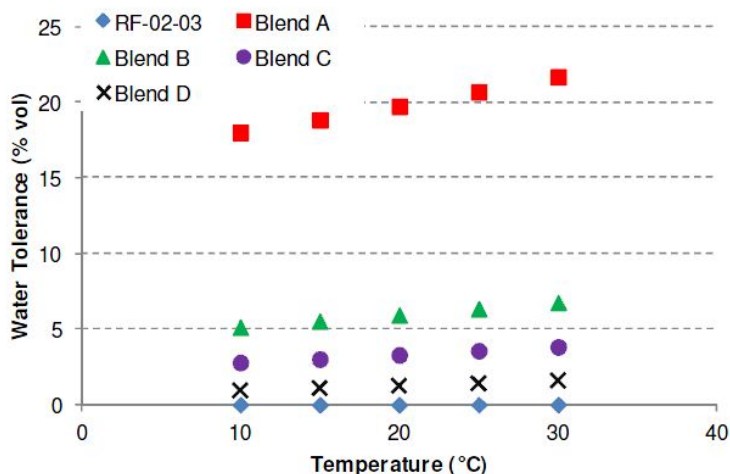
---

<sup>4</sup>ASTM D525, 360min

<sup>5</sup>ASTM D381 en D873, minder dan 1mg/100ml

<sup>6</sup>ASTM D6422-99 Standard Test Method for Water Tolerance (Phase Separation) of Gasoline-Alcohol Blends





Figuur 4.9: Watertolerantie van isostoichiometrische E85-mengsels [43]

## 4.5 Alternatieve ternaire mengsels

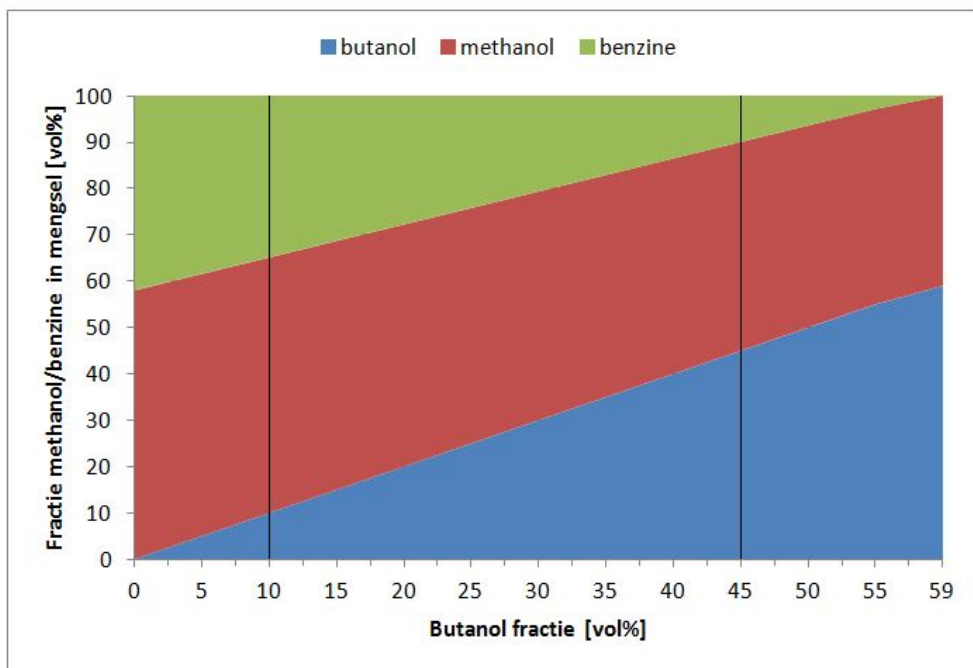
Om dit hoofdstuk af te sluiten volgen we nog even kort een gedachtegang om de invloed van alcoholen als alternatieve brandstof nog te vergroten. Zoals al eerder aangehaald kan men het concept om een bepaalde hoeveelheid ethanol te vervangen door methanol/benzine mengsel toepassen op eender welk ethanol/benzinemengsel. Hoofdzakelijk werd E85 onderzocht in de papers van Turner et al. [7, 43, 44] om het aandeel van de hernieuwbare alcoholen zo hoog mogelijk te houden. Isostoichiometrische mengsels maken van bijvoorbeeld een E15- of E22-mengsel is uiteraard ook perfect mogelijk.

Men merkte ook op dat indien men bij isostoichiometrische E85-mengsels gaat tot een maximale hoeveelheid methanol (M56), dat men dan nood heeft aan een co-solvent. Deze rol wordt door ethanol vervuld in mengsel B en C. Een andere gekende mogelijkheid als co-solvent is butanol, meestal met een minimum concentratie van 10 vol%.

Eerder dit hoofdstuk werd besproken hoe butanol bepaalde voordelen had ten opzichte van ethanol, waaronder ook naar productiemogelijkheden toe. Hiermee kan men tot de hypothese komen om een ternair mengsel te maken met als componenten benzine, methanol en butanol. Daar butanol mengbaar is met methanol en beiden afzonderlijk mengbaar zijn met benzine is het zeer waarschijnlijk dat bij (niet te extreme) omgevingsvoorwaarden de drie componenten samen mengbaar zijn. Men kan hiermee dan een mengsel maken dat isostoichiometrisch is met E85 en dit kan dienen als brandstof voor een flexfuel motor. Verder onderzoek naar de 'onzichtbaarheid' van deze mengsels is echter wel nog vereist. Zo hebben de GMB-mengsels

(*Gasoline-Methanol-Butanol*) een dalende LHV-waarde met toenemend gehalte butanol. De dichtheid zal echter de omgekeerde trend volgen waardoor de volumetrische energie-inhoud waarschijnlijk terug zal nivelleren tot de waarde van E85.

In figuur 4.10 ziet men een gelijkaardige voorstelling als bij de ternaire GEM-mengsels. Het toont het verloop van isostoichiometrische (met E85) mengsels in functie van de hoeveelheid butanol. De twee extreme GMB-mengsels zijn hier 'G42 M58 B0' en 'G0 M41 B59'. De afwijking ten opzichte van het M56-mengsel van Turner et al. [7] is te wijten aan de gebruikte waarden voor de benzine. Dit zijn echter de theoretische grenzen. Meer realistischere extrema zijn afhankelijk van fase-separatie en problemen bij een koude start. Om fase-separatie te voorkomen voorziet men een minimale concentratie van 10% butanol als co-solvent. Om problemen bij een koude start te voorkomen kan men bijvoorbeeld een minimale hoeveelheid benzine voorzien van 10 volumeprocent. Merk hierbij op dat er verschillende isomeren bestaan van (*iso-, n-, tert-*) butanol, dit heeft echter geen invloed op de berekening van de AFR-waarde van het mengsel. Dit zal wel invloed hebben op de massa specifieke LHV-waarde en de dichtheid van het mengsel. Zoals eerder opgemerkt bestaat de bio-butanol uit fermentatie grotendeels uit het isomeer met de lange keten: n-butanol. De gebruikte stoichiometrische AFR-waarden van de afzonderlijke componenten zijn getabelleerd in tabel 4.7.



Figuur 4.10: Ternair diagramma van GMB-mengsels

Deze eenvoudige theoretische rekenoefening voor de GMB-mengsels kan men uiter-

	<b>Benzine</b>	<b>Methanol</b>	<b>Ethanol</b>	<b>Butanol</b>
Stoich. AFR	14.6	6.43	8.95	12.05

Tabel 4.7: Stoichiometrische AFR-waarden

aard ook herhalen voor gelijkaardige ternaire samenstellingen. Zoals bijvoorbeeld een methanol-ethanol-butanol mengsel waarbij butanol dan de rol van benzine overneemt. De invloed en de vorm van de verdampingscurve is echter reeds een eerste van vele eigenschappen dat grote aandacht vereist.

## Hoofdstuk 5

# Sensoren en sturing van flexfuelmotoren

Zoals gezegd in vorig hoofdstuk kunnen de prestaties en emissies van de mengsels in flexfuelvoertuigen geoptimaliseerd worden door maximaal gebruik te maken van de eigenschappen van de verschillende componenten aanwezig in de brandstof. De parameters waarop de ECU in dit opzicht kan regelen zijn onder andere de injectieduur, de ontstekingstiming, kleppentiming en percentage EGR indien deze functies geïnstalleerd zijn op het voertuig. Om de motormapping op een ideale manier af te stellen bij variabele brandstofsamenstelling dient de alcoholinhoud van de brandstof bepaald te worden met behulp van een alcoholsensor. Daarnaast is een alcoholconcentratiebepaling onontbeerlijk wanneer bij variabele brandstofsamenstelling een correcte schatting van het nog beschikbare rijbereik wil bekomen. Dit kan met een fysieke of een virtuele sensor gebeuren, waarbij de eerste naast een hogere nauwkeurigheid ook een extra kost en gewicht met zich meebrengt.

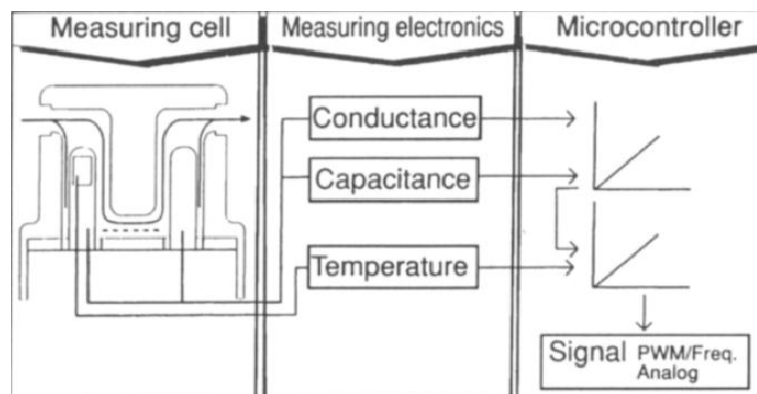
De in hoofdstuk 4 besproken isostoichiometrische GEM mengsels brengen in dit opzicht met hun drie componenten een extra moeilijkheid met zich mee. Turner et al. [7, 43] stelden echter vast dat voor zowel een fysieke als virtuele sensor deze brandstoffen geen probleem waren voor de ECU, ze zijn zogenaamd 'onzichtbaar': alle GEM brandstoffen worden door het motormanagement aanzien als E85. Praktisch betekent dit dat in bestaande flexfuelvoertuigen geen aanpassingen dienen gemaakt te worden en dat GEM mengsels als *'drop-in fuel'* kunnen gebruikt worden. In verder onderzoek moet blijken of GEM-blends de optimale werkingsomstandigheden hebben bij dezelfde instellingen als E85.

Om optimale werking te bekomen in toekomstige flexfuelvoertuigen is verder onderzoek naar nauwkeurigere sensoren onontbeerlijk. Omwille van economische en praktische aspecten zijn deze sensoren bij voorkeur zo licht en goedkoop mogelijk, of vereisen ze zo weinig mogelijk aanpassingen aan het voertuig. In het volgende wor-

den de mogelijke configuraties voor bepalen van alcoholconcentratie en bijhorende motorregeling besproken.

## 5.1 Fysieke sensoren

Reeds in 1991 rapporteert Siemens Automotive over de ontwikkeling van compacte alcoholensoren die in de brandstofrail de methanolverhouding bepalen. Hieruit wordt dan de injectiehoeveelheid bepaald waardoor de geschikte AFR kan bekomen worden. Binder [48] bespreekt de werking van enkele benodigde sensoren voor FFV's. Naast een Hall-probe voor krukassnelheidsmeting en een uitlaatzuurstofsensor wordt ook de werking van de Siemens methanol sensor uit de doeken gedaan. De relatieve permittiviteit is een goede maatstaf voor de methanolconcentratie in de brandstof. Deze wordt opgemeten door een condensator, terwijl de fout door ionische geleidbaarheid gecompenseerd wordt door een elektronische geleidbaarheidsmeting. De sterke temperatuursafhankelijkheid van dit resultaat wordt op zijn beurt gecorrigeerd door een temperatuursmeting. Een schematische voorstelling van de sensor is te vinden op figuur 5.1.



Figuur 5.1: Concept alcoholsensor [48]

Enkele jaren later presenteerden Hofmann et al. [49] in samenwerking met onder andere ook Binder van Siemens Automotive een geavanceerde versie van een dergelijke alcoholsensor. Het betreft een microbewerkte 3D structuur bekomen door etsen van siliciumwafers, een voor die tijd relatief nieuw technologisch proces. Er wordt een significante afmetings- en gewichtsreductie bekomen, gecombineerd met een sterk verhoogde nauwkeurigheid.

Een verdere ontwikkeling van dit sensorconcept specifiek voor bepaling van ethanolconcentratie in brandstofdampen wordt beschreven door Benvenho, II en Gruber [50]. Hiervoor gebruikten zij een nieuw ontwikkeld geleidend co-polymeer genaamd

poly[(2-bromo-5-hexyloxy-1,4-phenyleenvinyleen)-co-(1,4-phenyleenvinyleen)] of afgekort *BHPPV-co-PPV*. Gedopeerd met dodecylbenzeenzwavelig zuur geven deze sensoren een lineaire respons in functie van de ethanolconcentratie. Met een richtprijs van 1 dollar is deze sensor uiterst goedkoop en een interessant alternatief voor de huidig vaak gebruikte regeling met de lambdasensor [zie verder 5.2.1].

Het recentere werk in dit vakgebied spitst zich toe op verhogen van de sensitiviteit en selectiviteit en verlagen van de responstijd en hersteltijd. Dit voor verschillende alcoholen bij voorkeur met één enkele sensor door middel van nieuwe materiaalontwikkelingen en Virtual Sensor Arrays. Voor dit laatste concept wordt op verschillende manieren gemeten met één sensor wat een verhoogde selectiviteit mogelijk maakt. De afweging tussen meetfrequentie en sensorkostprijs (hoe hoger de frequentie hoe duurder) bepaalt de selectiviteit. Beckers et al. [51] ontwikkelden een nanogestructureerde dunne filmsensor die functioneert op kamertemperatuur. De sensor bestaat dankzij een nieuw productieproces (GLAD - *Glancing Angle Deposition*) uit een zeer dunne film met groot contactoppervlak. Mede hierdoor en door toepassing van het Virtual Sensor Arrayconcept kan hij selectief en kwantitatief de brandstoffen methanol, ethanol en 2-propanol beoordelen voor verschillende concentraties. Katalytische oxidatie van de alcoholmoleculen op de dunne GLAD film kan de sensorlevensduur drastisch beperken. Een oplossing wordt gegeven in de vorm van UV-LED licht die een levensduurverlenging oplevert voor werking van de sensor op ethanol en 1-butanol.

Een laatste versie van fysieke sensoren zijn de optische sensoren die door middel van bijna-infrarode spectroscopie de brandstofsamenstelling in de tank bepalen. Lunati en Fournel [52] ontwikkelden een dergelijke NIR (*Near Infrared*) spectroscopische sensor die in staat is zowel het percentage methanol als ethanol te bepalen in ternaire mengsels. Dit met een standaardafwijking van de voorspelling van respectievelijk 1.7 en 2 % voor deze twee alcoholen. Een lichtbron zendt licht met verschillende golflengtes door een brandstofstaal waar een deel van de energie geabsorbeerd wordt en het resterende licht door de NIR detector opgevangen wordt. Het systeem werd ontwikkeld om de derde harmonische van de moleculaire vibraties te gebruiken, waardoor men in de golflengterange van 800 – 1000 nm zit en eenvoudige LEDs gebruikt kunnen worden als lichtbron. Dit maakt de verwerking van het signaal niet eenvoudiger maar er kan zoals gezegd wel een voldoende nauwkeurigheid bekomen worden.

## 5.2 Virtuele sensoren

Om het extra gewicht en de bijkomende kost die fysieke sensoren met zich meebrengen te vermijden wordt hedendaags voornamelijk geopteerd voor zogenaamde virtuele sensoren. De boordcomputer berekent op basis van uitlezingen van andere druk- of zuurstofsensoren zo nauwkeurig mogelijk de alcoholconcentratie van de gebruikte brandstof. Hoewel er bij deze werkwijze ingeboet wordt aan selectiviteit en sensitiviteit kan er toch een voldoende snelle regeling bekomen worden.

### 5.2.1 Exhaust Oxygen sensor

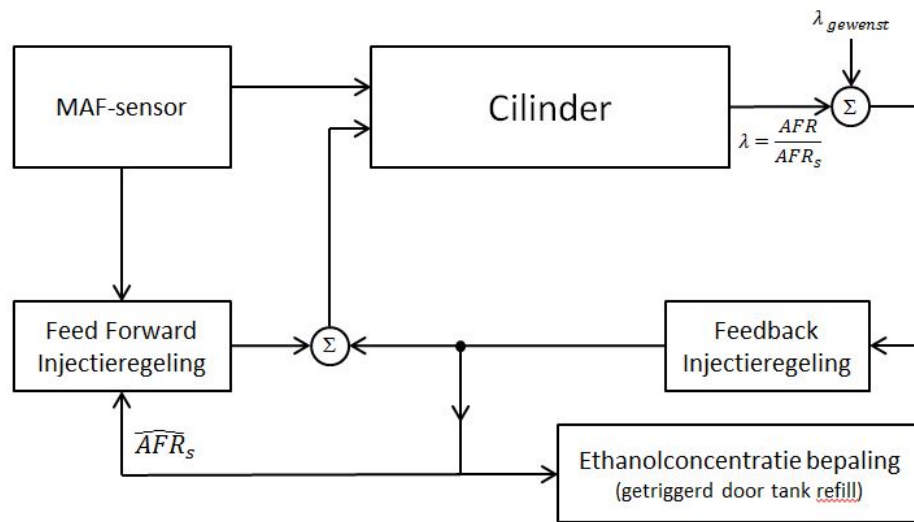
Een veelgebruikte uitvoering is een zuurstofsensor (*Exhaust Gas Oxygen sensor* - EGO) in de uitlaat, ook wel gekend als lambdasensor. Met behulp van de geschatte of gemeten inlaatlucht (MAF) en de gekende injectieduur wordt de stoichiometrische AFR bepaald. Met deze gegevens kan dan de concentratie alcohol berekend worden. Een vereenvoudigd schema van de regeling van het systeem wordt weergegeven in figuur 5.2 en de ethanolinhoud wordt als volgt geschat:

$$\hat{e}_m = \frac{14.6 - (\widehat{AFR})_s}{5.6}$$

Waarbij  $\hat{e}_m$  de geschatte massainhoud ethanol voorstelt en  $(\widehat{AFR})_s$  de geschatte AFR. Deze methode is echter ook sterk sensitief aan afwijkingen op de MAF meting (en injectordrift), zoals wij bij het uitvoeren van de experimenten ook zelf kunnen ondervinden hebben. De schatting van de brandstofsamenstelling wordt getriggerd wanneer de tank gevuld wordt, zodat er zo weinig mogelijk invloed is van andere sensorafwijkingen. Een verdere correctie kan bekomen worden door integratie van EGO en MAP (*Manifold Absolute Pressure*). Een meer uitgebreide bespreking met betrekking tot de werking van het regelschema wordt verwezen naar het werk van Ahn et al. [53, 54].

Nadeel van deze werkwijze is dat de EGO in de uitlaat moet geplaatst zijn en dus bestand moet zijn tegen extreem hoge temperaturen. Ook dient er een elektrische verwarming voorzien te worden voor opstart en het op temperatuur houden van de sensor bij stationair draaien. Deze temperatuursregeling moet zelfs een nauwkeurigheid van 25 °C hebben om een correcte werking te bekomen. [48]

Dit concept bestaat al meerdere jaren en ook in [48] werd een dergelijke configuratie voorgesteld. Hier werd dan specifiek de focus gelegd op de ontwikkeling van een ultrasnelle sensor die een cilinderspecifieke regeling kan voorzien. Met een reactietijd



Figuur 5.2: Regelschema lambdasensor voor ethanolconcentratiebepaling [54]

bij overgang van rijke naar arme werking van 10 ms kwamen ze toen al dicht in de buurt van de vooropgestelde 5 ms. Er kan besloten worden dat de sensor voldoende snel is voor controle van verbranding in elke cilinder apart met een gesloten lusregeling. In huidige uitwerkingen wordt echter om de kosten en complexiteit te beperken vaak gekozen voor een lambdasensor die werkt met een gemiddelde waarde voor alle cilinders.

Wang [55] bemerkte bij een studie van de dynamica van een moderne EGO sensor een gelijkaardige oxidatie op de electrode bij arme werking als Beckers et al. [51] op hun fysieke sensor. Nazarpour et al. [56] stellen echter een andere oplossing voor om de schade aan de electrode te beperken. Door aanbrengen van een poreuze grafiet of nanokoolstofvezellaag kan de voorziene levensduur intact gehouden worden terwijl er nauwelijks aan responstijd moet ingeboet worden.

### 5.2.2 Cilinderdrukmetingen

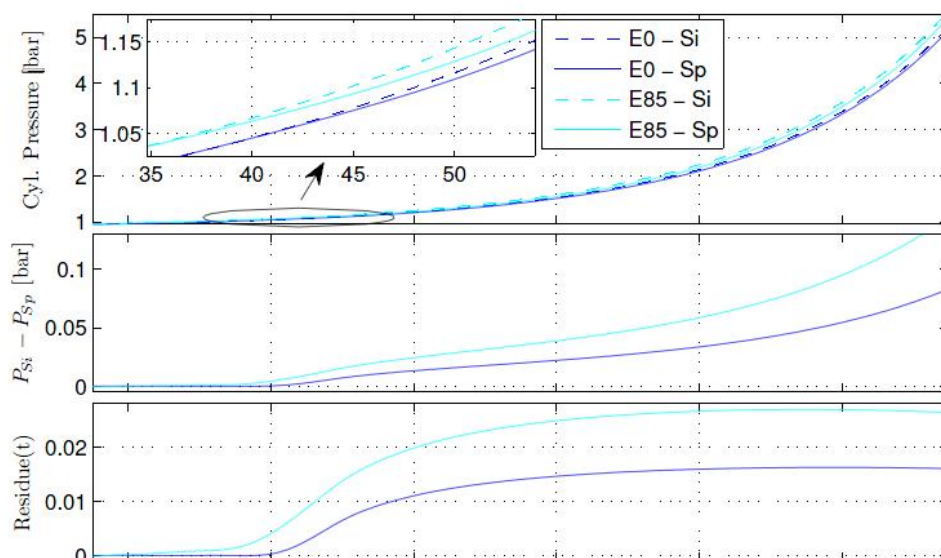
Een andere eigenschap die minder onderhevig is aan fluctuaties dan de lambda-waarde is de latente verdampingswarmte van de brandstof. Deze kan onder meer bepaald worden uit cilinderdrukmetingen zoals uit het hiernavolgende zal blijken.

Oliverio et al. [57] werkten aan een model dat op basis van de ethanolconcentratie voorspelt hoe de cilinderdruk zal evolueren. De uitkomst werd gevalideerd op een 2.0 L turbogeladen flexfuelmotor met directe injectie en variabele kleppentiming (VVT). Het koeffect van de geïnjecteerde brandstof zorgt voor een hogere volumetrische



efficiëntie aangezien er meer lucht de cilinder kan binnenstromen. Dit heeft echter weinig tot geen bruikbaar effect op de cilinderdruk. Er worden twee injectiemodes gedefinieerd waartussen onderscheid wordt gemaakt om het effect van de hogere verdampingsenthalpie van ethanol waar te kunnen nemen:

- Single Injection (Si) : de volledige injectie gebeurt tijdens de inlaatslag
- Split Injection (Sp) : een fractie wordt geïnjecteerd gedurende de inlaatslag, de rest kort na IVC (*Inlet Valve Closing*) gedurende de compressieslag



Figuur 5.3: Cilinderdrukmeting residu [57]

Uit figuur 5.3 kan afgeleid worden dat de cilinderdruk voor de Si-modus hoger is dan in Sp-modus onder dezelfde werkingscondities van de motor. Ook is duidelijk dat dit effect hoger is voor de brandstof E85 dan voor de zuivere benzine. Dit kan verklaard worden door het verminderde ladingskoeleffect van de tweede injectie in Sp-modus.

Batteh en Curtis [58] berekenden een factor 'residu' om zo eenduidig mogelijk uit deze metingen een verband te kunnen leggen met de ethanolconcentratie. Na normalisering, cyclusuitmiddeling en filtering van de cilinderdrukoutput voor beide injectiemodi wordt het residu als volgt berekend:

$$Residu(k) = \log(P_0^{Si}(k)) - \log(P_0^{Sp}(k))$$

Voor de drie geteste mengsels in het werk van Oliverio et al. wordt een significante lineaire relatie bekomen tussen het ethanolgehalte en de gegenereerde residuen bij de

toerentallen 1500 tpm en 3000 tpm. Enkel bij 2000 tpm wordt er een niet-lineariteit gerapporteerd bij de brandstof met hoog ethanolgehalte. Ahn et al. [53] concluderen dat een dergelijke manier van ethanolvoorspelling minder onderhevig is aan variaties en fouten door injectordrift.

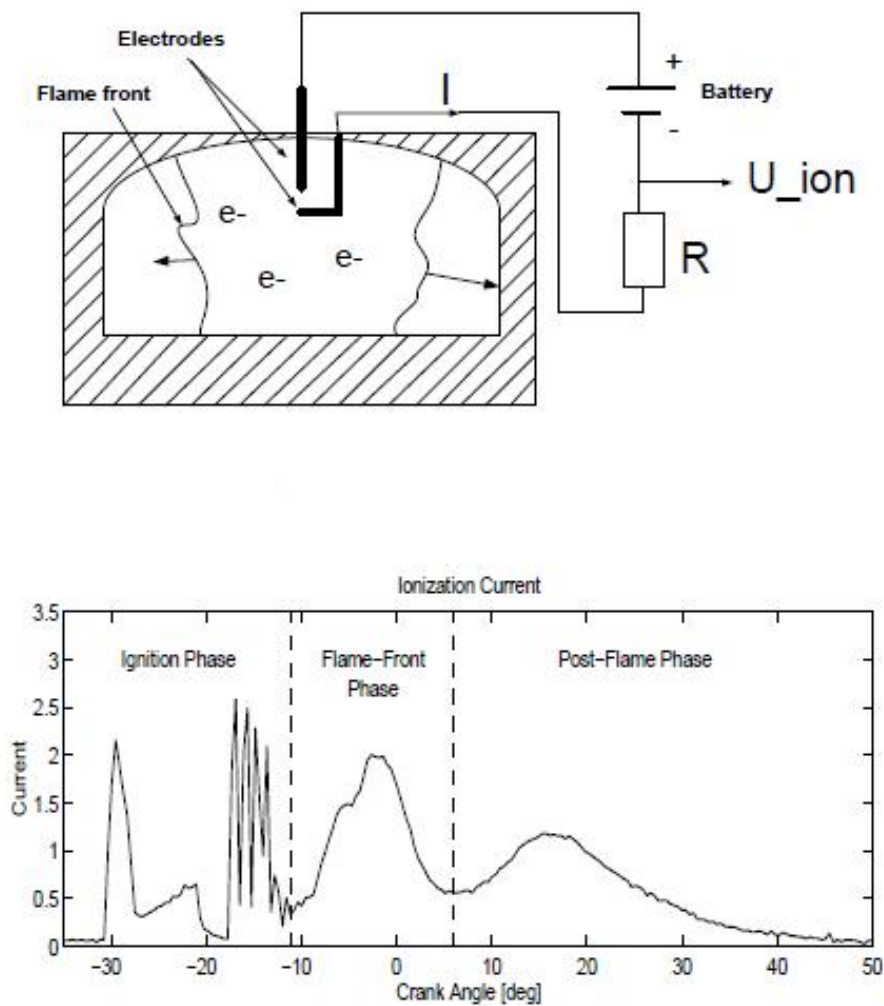
Deze manier van alcoholconcentratiebepaling biedt mooie perspectieven met betrekking tot nauwkeurigheid en implementatie maar wordt in zijn toepassing hedendaags nog afgeremd door de kostprijs van de belangrijkste component, namelijk de cilinderdruksensor(en).

### 5.3 In-cylinder ion sensing

Een laatste concept van virtuele sensoren voor deze toepassing is er een die oorspronkelijk ontwikkeld werd voor synchronisatie van cilinders en detectie van voortijdige ontsteking. Het gebruik kan echter uitgebreid worden voor toepassingen als cilinderdrukmeting, rechtstreekse AFR-bepaling en zelfs klopdetectie. De bougies van de verschillende cilinders worden gebruikt om gedurende het verbrandingsproces de ionenstroom vast te leggen. Uit deze signalen wordt dan gepoogd om zoveel mogelijk informatie te halen met betrekking tot het verloop van de verbranding. Het grote voordeel is dat er geen extra componenten of aanpassingen aan de motor (buiten een meetcircuit en signaalverwerking) dienen voorzien te worden terwijl men toch een cilinderspecifieke regeling kan bekomen.

Figuur 5.4 schetst de werking van het systeem. In de eerste fase (*Ignition Phase*) kan men de opbouw van de lading op de bougie zien (eerste piek bij  $-30\text{ }^{\circ}\text{ca}$ ) waarbij na de ontlading een oscillatie bemerkt wordt (tweede reeks pieken t.h.v.  $-15\text{ }^{\circ}\text{ca}$ ). Gedurende de tweede fase (*Flame-Front Phase* - piek t.h.v.  $-5\text{ }^{\circ}\text{ca}$ ) geeft de ionisatie weer door de chemische reactie aan het vlamfront wanneer dit passeert in de opening tussen de electrodes van de bougie. De derde fase (*Post-Flame Phase*) vertoont een piek t.h.v.  $15\text{ }^{\circ}\text{ca}$  te wijten aan thermische ionisatie van  $\text{NO}_x$  in de hete eindgassen. Een meer uitgebreide bespreking van deze fenomenen en bijhorende modellering wordt gegeven in het werk van Andersson et al [59].

Aan de Linköping universiteit in Zweden werd reeds veel onderzoek verricht naar de interpretatie en het bruikbaar maken van de ionisatiestroom. Eriksson en Nielsen [60] testten op een Saab 2,3 L viercilinderproductiemotor enkele parametrische modellen voor de beschrijving van het drukverloop in de cilinders. De evaluatie gebeurt met behulp van een druksensor die gemonteerd zit in een van de cilinders. Er wordt gewerkt naar optimalisatie van de ontstekingstiming op basis van de gewonnen informatie. Een voldoende dichte benadering van het drukverloop kan uit het ionisatiestroomsignaal gehaald worden door keuze van een gepast model.



Figuur 5.4: Concept ionsensing [59]

Chao Daniels van Cooper Automotive Products vroeg in 2000 een patent aan [61] waarin hij een techniek beschrijft om op basis van het ionensignaal de massa verbrande brandstof te bepalen. Ook wordt een methode voorgesteld om door interpretatie van het signaal het punt van maximale vlamversnelling en maximale warmteafgave vast te leggen.

Een verderzetting van het onderzoek aan de Zweedse Linköping universiteit gebeurde onder Nielsen in de vorm van de thesis van Andersson [59]. Verdere ontwikkeling van een cilinderdrukmodel op basis van de ionisatiestroom wordt gerealiseerd. Dit met de bedoeling om het model simpel te houden en vooral direct bruikbaar in productiewagens waarin de gebruikte parameters reeds opgemeten en getuned kunnen worden. Vertrekkende van dit drukmodel wordt, samen met een NO-formatiemodel, een thermisch ionisatiemodel en een model voor de verbrandingstemperatuur, een

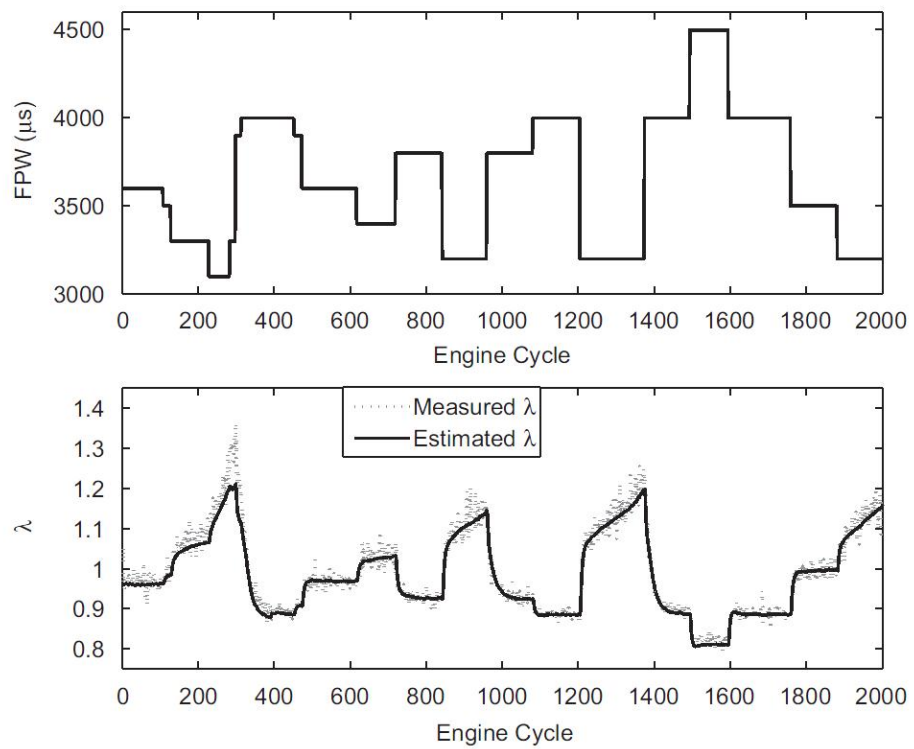
overkoepelend model geconstrueerd dat het thermische deel van de ionisatiestroom beschrijft. Met een maximale afwijking van de cilinderdrukpiek van 3°kh in timing en 20 % in amplitude kan dit model gebruikt worden om als virtuele cilinderdruk-sensor te dienen. Deze mate van afwijking is aanvaardbaar om het drukverloop kwalitatief te kennen, maar maakt de virtuele sensor onbruikbaar voor ethanolconcentratiebepaling.

Ook Mehresh et al. [62] stellen dat in-cilinder ionisatiestroommeting een geldig en economisch interessant alternatief is voor de dure druksensoren. Deze conclusie wordt gevormd in het kader van hun onderzoek naar de verbrandingstiming in propaangevoede HCCI motoren. Na opstellen en valideren van hun model kon zelfs bij zeer arme verbranding (equivalentie ratio  $\phi = 0,35$ ) een bruikbare ionisatiestroom geconstateerd worden.

Om een waardige vervanger te zijn voor piëzoelektrische druksensoren dienen regelingen met de virtuele versies ook bij transiënte werking gelijkwaardige prestaties voor te schotelen. Rivara et al. [63] werkten aan een artificieel neurale netwerk voor schatting van AFR bij sterk variërende last en snelheid. Met als inputs een PCA (principiële componentenanalyse) van het ionisatiesignaal, MAP, FPW en toerentalmeting wordt het adaptieve zelflerende netwerk offline gedurende 3000 motorcycli getraind op het voorspellen van de AFR. Het resultaat van de aangeleerde schatting wordt vergeleken met behulp van de lambdasensor van een viercilinder 1,6L PFI vonkontstekingsmotor.

Online validaties van de correcte werking werden uitgevoerd eerst door afzonderlijke variaties in toerental, belasting en injectieduur en daarna voor een gelijktijdige variatie van deze parameters. Het resultaat van deze laatste meting wordt voorgesteld in figuur 5.5 waarbij de geschatte en gemeten lambdawaardes tegenover elkaar worden uitgezet. Het is duidelijk dat bij sterk arme werking de afwijkingen het grootst zijn. Dit wordt verklaard door het feit dat de vast opgelegde FPW in deze test geen normale motorwerking voorstelt waardoor de AFR-schatting een iets realistischere lagere waarde voorstelt.

Er kan besloten worden dat met het voorgestelde systeem een voldoende nauwkeurige schatting bekomen wordt voor motorregeling onder transiënte werking. Gezien de eenvoud van uitvoering en de vooropgestelde lage investeringskost kan dit systeem makkelijk uitgebreid worden voor cilinderspecifieke werking.



Figuur 5.5: Gemeten en geschatte lambda-waarden [63]

## Hoofdstuk 6

# Directe injectie

Methanol en zuurstofhoudende alcoholen in het algemeen bieden de mogelijkheid om op een duurzame manier het rendement en daaraan verbonden BSFC van vonkontstekingsmotoren te verbeteren. Verdere technologische ontwikkelingen zijn nodig om de in dit opzicht superieure compressieontstekingsmotoren te kunnen concurreren. Een dergelijke doorbraak die ten volle de voordelige eigenschappen van alcoholen kan benutten is directe injectie (DI). Een brandstofspray wordt direct in de cilinder geïnjecteerd waardoor een ontsteekbaar lucht/brandstof-mengsel bestaat aan de bougie op het moment van ontsteking. Op deze manier kan bij WOT een stabiele werking verkregen worden zonder ladingsverlies in de gasklep, waarbij EGR ook een belangrijke rol kan spelen. Met ook een mogelijkheid tot ultra-arme werking ( $\lambda = 3$  [64]) en verhoogde compressieverhouding bij alcoholen komt een dieselwaardig rendement een stap dichtter terwijl de vele voordelen van de vonkontstekingsmotor (lagere PM en  $\text{NO}_x$  emissies, geluidsniveau, toerentalbereik) behouden blijven. Zoals reeds aangehaald in hoofdstuk 4 speelt het koeleffect van de lucht/brandstofmengselvorming hier ook een niet te verwaarlozen rol in.

Dit hoofdstuk zal een beeld proberen te schetsen van de huidige stand van de techniek inzake regeling en toepassing van DI motoren. In een lijvige samenvatting gemaakt door Zhao et al. [65] worden alle technologische aspecten horende bij DI motoren besproken. Wij bouwen hier met recentere publicaties specifiek voor alcoholen of mengsels met alcoholen op voort.

### 6.1 Technologische voordelen voor alcoholen

Voor deze paragraaf wordt de lezer naar bijlage A verwezen.

## 6.2 Onderzoek specifiek met alcoholen

Het staat vast dat alcoholen met hun hoge latente verdampingswarmte en lage AFR optimaal gebruik kunnen maken van het ladingskoeleffect door directe injectie in de cilinder. Het verhoogde volumetrische rendement door deze technologie kan dus ten volle benut worden indien er in de toekomst gekozen wordt voor lichte alcoholen als vervanger voor conventionele fossiele brandstoffen zoals besproken in deze masterthesis. In de literatuur valt al behoorlijk wat informatie te vinden over recente toepassingen van deze technologie specifiek voor ethanol, methanol en mengsels hiervan met benzine. Bij Lotus onderzochten ze ook reeds het potentieel van ternaire mengsels in DI-motoren.

### 6.2.1 Ethanol

D. Turner et al. [66] bevestigen voor verschillende ethanolconcentraties en ontstekingstiming van de mengsels de positieve invloed van het koeleffect en de hogere vlamsnelheid op het rendement, de engine-out emissies en de verbrandingsstabiliteit. Dit ook voor zowel een enkele als een even lange dubbele injectie. Specifiek worden voor verhoogde concentraties ethanol volgende voordelen genoteerd: licht verlaagde  $\text{NO}_x$  emissies, verlaagde CO emissies voor de modus met enkele injectie en een verhoogde motorefficiëntie. Ook hier wordt geconcludeerd dat meervoudige injectiestrategieën uiterst geschikt zijn voor deellastwerking.

Eenzelfde onderzoek werd uitgevoerd door Chen et al. [67] voor gelijkaardige volumepercentages bij hetzelfde toerental (1500 tpm). Hier wordt echter specifiek gekeken naar de mengselvorming en PM emissies door middel van een optisch toegankelijke cilinder. Er wordt bij verhoogde ethanolconcentratie een uitstoot van meer en grotere deeltjes vastgesteld, waarbij dit effect het sterkst is bij koude werking. Dit resultaat wordt toegeschreven aan de stijgende inhomogeniteit van de mengselvorming bij een hoger ethanolgehalte van de brandstof. Bij niet-stoichiometrische werking kan een verhoogde ethanolinhoud echter een positieve invloed hebben op de PM emissies door de zuurstofinhoud van de brandstof. Een laatste eerder verrassende conclusie is dat de verbranding van mengsels met hogere ethanolconcentratie trager verloopt. Dit is echter volledig contradictorisch aan de bevindingen van D. Turner [66] die quasi dezelfde experimenten uitvoerde en bij verhoogde ethanolinhoud een verhoging van de verbrandingssnelheid waarneemt. Dit afwijkende resultaat kan enigszins verklaard worden door een lagere cilindertemperatuur waardoor de atomisatie van de brandstofspray minder goed verloopt en de inhomogeniteit door de toegevoegde ethanol een overwegende negatieve werking heeft op de verbrandingssnelheid.

Sementa et al. [68] onderzochten de verschillen voor DI tussen pure benzine en pure bio-ethanol met zowel gestratificeerde als homogene lucht/brandstofmengsels. Hier wordt voor gestratificeerde werking opnieuw een stabielere verbranding voor de alcohol gerapporteerd, samen met verlaagde PM (in het bijzonder roet) en HC emissies. Wat de auteurs ook stellen is dat voor de alcohol de spray minder onderhevig is aan afwijking door de luchtstroming en een compactere vorm aanneemt dan de benzinespray. Dit doordat bij tragere verdamping van ethanol de spray minder beïnvloed wordt door de luchtstroming, in het bijzonder bij gestratificeerde werking wanneer de injectie gebeurt bij reeds gesloten inlaatklep.

### 6.2.2 Methanol

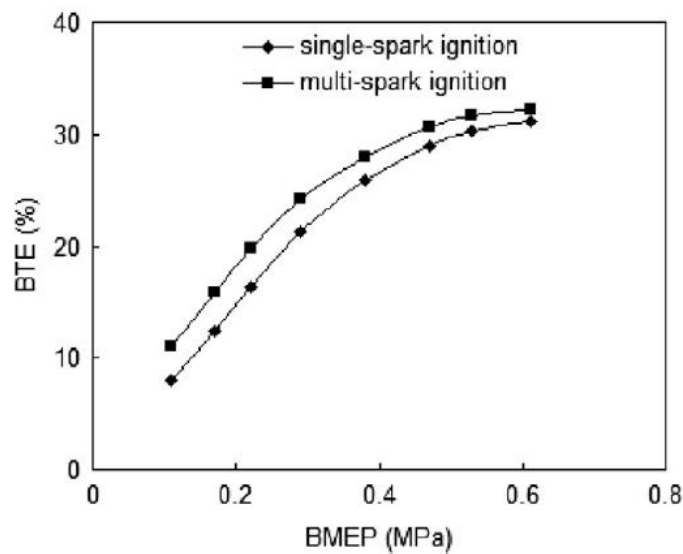
Gong et al. [69, 70, 71] namen een methanolmotor onder handen en bestudeerden het effect van ontstekingsysteem, compressieverhouding en injectorconfiguratie op deellastrendement, emissies en cycle-by-cycle verbrandingsvariatie (met COV als bestudeerde parameter). De resultaten worden vergeleken met de bekomen resultaten voor metingen op diesel.

In plaats van een vonksysteem dat één enkele vonk geeft, werd een systeem met meerdere vonken en resulterende dubbele vonkenergie uitgetest. Er wordt bij lage belasting een winst in BTE van gemiddeld 25 % geboekt ten opzichte van het systeem met enkele vonk, die verklaard wordt aan de hand van een hogere verbrandingssnelheid door de hogere vonkenergie (zie figuur 6.1). Op deze figuur is ook zichtbaar dat dit ontstekingsysteem zelfs bij iedere belasting een beter resultaat geeft.

De testmotor heeft een variabele compressieverhouding instelbaar op 14:1 en 16:1. De compressieverhouding van 14:1 heeft bij lage last een lagere BTE tot gevolg en bij hoge lasten een hogere BTE. Met een hoger aantal kleine injectorgaten wordt een hogere BTE gehaald dan met een injector met minder maar grotere gaten.

Het is duidelijk dat dergelijke parameterwijzigingen een belangrijke invloed hebben op het rendement van een methanolmotor bij lage last. De waarden voor dieselmotoren kunnen wel enkel bij hogere lasten geëvenaard worden. Wat betreft de emissies kunnen significante winsten geboekt worden voor CO (11 %) en NO<sub>x</sub> (50 %) ten opzichte van dieselmotoren. Zoals bekend is zijn bij methanol de HC emissies een pijnpunt en hier is dat niet anders. Er wordt een verhoging van 273 % gerapporteerd, wat natuurlijk niet opweegt tegen de eerder beperkte winsten voor de andere emissies. Voor de COV wordt ook een significante afhankelijkheid van injectie- en ontstekingstiming, compressieverhouding en injectorconfiguratie bevonden. Hierbij valt het op dat de COV telkens minimaal is voor de optimale instellingen van deze waarden van de motor.





Figuur 6.1: Afhankelijkheid BTE van vonkontstekingsysteem, single-spark en multi-spark [70]

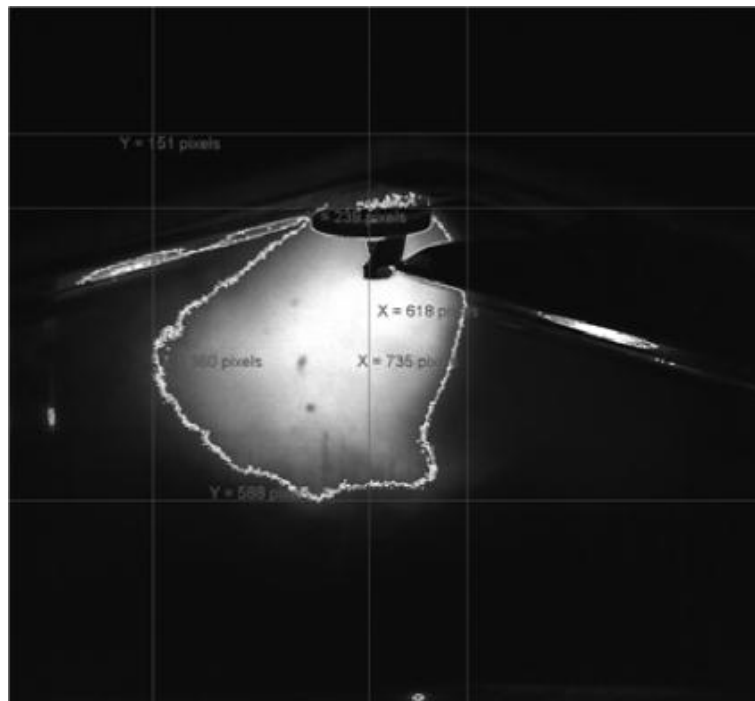
In een zeer recente publicatie worden de PM emissies van een DI en PFI wagen vergeleken voor zowel benzine als M15. Liang et al. [72] concludeerden dat voor beide voertuigen methanol minder en kleinere deeltjes uitstoot dan benzine. Voor beide brandstoffen en voor elke emissiemeting werd meer PM vastgesteld op het voertuig met DI dan op het voertuig met PFI. Er werd gepoogd om een model op te stellen om de PM emissies te voorspellen. Het feit dat een veel te lage schatting bekomen wordt in vergelijking met de experimentele resultaten toont aan dat er nood is aan verder onderzoek in dit gebied om de processen die bijdragen aan een verhoogde uitstoot te kunnen identificeren en kwantificeren.

### 6.2.3 Ternaire mengsels

Over het algemeen blijkt dat toepassing van DI voor alcoholen een mooie bijdrage kan leveren in het streven naar combineren van de voordelen van zowel vonkontstekingsmotoren als compressieontstekingsmotoren. De vraag is nu natuurlijk of en in welke mate dit ook geldt voor ternaire GEM mengsels. In hun meest recente werk nemen Turner et al. [44] van Lotus Engineering de proef op de som voor benzine, methanol, E85 en twee isostoichiometrische GEM mengsels. In hun optisch toegankelijke SCORE (*Single Cylinder Optical Research Engine*) met een compressieverhouding van 10:1 onderzochten ze voor twee vaste condities (2.7 bar en 3.7 bar NMEP bij 2000 tpm) de injectieduur, de sprayvorming en de verbrandingsthermodynamica.

In vergelijking met de vorige papers werd een afwijkend brandstofverbruik vastgesteld met uitschieters tot 13 %. Voor de andere experimenten bedroeg deze afwijking maximaal 3 %. De redenen van deze afwijking zijn moeilijk in te schatten aangezien in het eerder gebruikte flexfuelvoertuig een ongekende motormapping actief is terwijl in de SCORE een vaste ontstekingstiming werd gebruikt. De lastregeling werd bekomen door FPW- en gasklepvariatie terwijl een stoichiometrische AFR vastgehouden werd.

Voor bespreking van de sprayvorming wordt voor iedere brandstof met behulp van Mie-imaging een beeld gevormd van de spray op hetzelfde tijdstip in de motorcyclus. Een voorbeeld van een dergelijk vastgelegd beeld voor G44E0M56 wordt gegeven door figuur 6.2.



Figuur 6.2: Sprayvorming voor G44E0M56 vastgelegd met behulp van Mie-imaging [44]

De bestudeerde parameters voor de sprays zijn de penetratie, de laterale spraybreedte en de hoekafwijking die de spray maakt door de inkomende luchtstroom. De twee GEM mengsels worden de grootste penetratie toegeschreven. Een opmerkelijke tegenstelling met een vorige referentie [68] (zie paragraaf ethanol) is dat de benzinespray een hogere compactheid heeft dan de spray met ethanol, ook al betreft het hier E85 en geen pure ethanol. In beide werken wordt wel vastgesteld dat de ethanol spray slechts een weinig beïnvloed wordt door de inlaatlucht, hier wordt dit kwantitatief vastgesteld door de hoek van de spray. Voor M100 wordt een zeer brede spray bekomen, dit is niet zo interessant aangezien cilinderwandbevochtiging zoals

eerder besproken nadelig is voor het brandstofverbruik en de emissies. Deze grotere dispersie bij alcoholhoudende mengsels kan verklaard worden door het fenomeen van flash boiling van de lichtere alcoholen, wat meteen ook de compactere spray van het zwaardere deeltjes bevattende benzine verklaart.

Een van de voornaamste resultaten van dit onderzoek was dat de gebruikte injector voor verschillende brandstoffen bruikbaar is, zij het dat de bekomen sprays wel variëren in functie van de brandstofeigenschappen. Het volledige potentieel van GEM mengsels in DI-motoren kan echter niet uit deze uiteenzetting opgemaakt worden aangezien de ontstekings timing, injectie timing en andere bepalende instellingen niet benut worden.

## Hoofdstuk 7

# Praktische realisatie

In dit hoofdstuk worden de mogelijke problemen bij het gebruik van (mengsels met) lichte alcoholen als brandstof voor vonkontstekingsmotoren besproken. In vele papers worden slechts de voordelen van (m)ethanol opgesomd en worden de mogelijke nadelen stilgezwegen. Indien men in de toekomst wil overschakelen naar deze hernieuwbare alcoholbrandstoffen moet men het volledig plaatje kunnen bekijken. Hier zullen dus enkele mogelijke problemen besproken worden, waaronder faseseparatie, transport van alcoholen (pijpleidingen of treinen), materiaalcompatibiliteit, brandveiligheid en gezondheidsproblemen. Uiteraard worden ook potentiële oplossingen naar voren gebracht die deze nadelen kunnen oplossen of tenminste kunnen verminderen.

### 7.1 Faseseparatie

Faseseparatie is een van de meest gekende problemen bij (m)ethanol/benzine-mengsels. Pure benzine kan slechts een kleine hoeveelheid water in zich opnemen. Indien een bepaalde grens overschreden wordt, dan zullen er twee gescheiden lagen ontstaan met een benzinerijke laag en een waterrijke laag. Indien ethanol aan de benzine wordt toegevoegd, zal de watertolerantie stijgen [73, 43]. Deze tolerantie daalt echter bij dalende temperaturen en indien de grens overschreden wordt, dan treedt er terug faseseparatie op.

Via deze redenering kwam men tot de vaststelling dat men liefst een lagere watertolerantie had van het mengsel. Indien faseseparatie optreedt bij een (m)ethanol/benzine-mengsel, dan zou er zich een laag vormen met hoofdzakelijk water/alcohol-mengsel en een laag met benzine/alcohol-mengsel. Het is inderdaad wenselijk dat dit niet voorkomt in de opslagtank van een wagen, daar het serieuze problemen zou veroorzaken indien de motor plots gevoed wordt door een watermengsel. Het feit dat er een groot deel (m)ethanol zou overgaan van de benzine naar het water is te verklaren

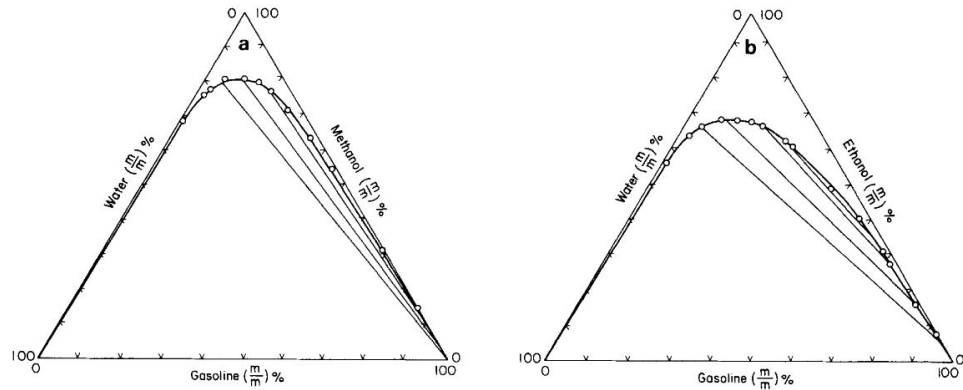
door het verschil in densiteit, de polariteit en de oplosbaarheid in water van lichte alcoholen ten opzichte van benzine.

De polariteit van het alcohol/water-mengsel zal hierbij veranderen en men heeft vastgesteld dat aromatische koolwaterstoffen (zoals toluen en benzeen) de neiging hebben om beter oplosbaar te zijn in een ethanol/water-mengsel dan in puur water [74]. Ook alkenen zouden meer mengbaar zijn in een ethanol/water-mengsel dan in benzine door hun  $\pi$ -bindingen. Dit zorgt er dus voor dat de benzine gaat degraderen en dat o.a. de klopresistentie zal dalen. Indien de brandstof in grote hoeveelheden in contact zou komen met grondwater (door bv. een lekkende opslagtank), kan dit zo het water gaan vervuilen met deze stoffen. Grondwater met grotere hoeveelheden ethanol is ook beduidend corrosiever en kan zo op zijn beurt ondergrondse metalen opslagtanks gaan corroderen tot er een lek ontstaat. Deze tanks kunnen zo het risico lopen om milieuvervuilende vloeistoffen te verspreiden in de natuur [75].

Om fase-separatie te vermijden moet men zorgen dat de temperatuur waarbij het fenomeen optreedt zo laag mogelijk wordt gehouden. Dit kan men doen door een co-solvent aan het methanol/benzine-mengsel toe te voegen. Enkele mogelijkheden die aangehaald worden in de literatuur zijn ETBE (Ethyl Tert Butyl Ether), ethanol en tert-butanol [73, 76]. Turner et al. bevestigden met hun eigen testen dat een methanol/benzine(M56)-mengsel inderdaad separeerde na een nacht rusten en dat bij hun overige mengsels, waaronder een E85-mengsel, geen fase-separatie optrad. Dit wijst inderdaad in de richting dat ethanol een goede co-solvent is voor methanol/benzine-mengsels en dat de ternaire mengsels dus mogelijk de problemen van fase-separatie kunnen doen verminderen. Het feit dat het M56-mengsel separeerde en het E85-mengsel niet, kan worden verklaard aan de hand van de bevindingen van Letcher et al. [77] Zij stelden namelijk vast dat ethanol/benzine-mengsels beter water konden opnemen dan methanol/benzine-mengsels (figuur 7.1). De oorzaak hiervan ligt grotendeels bij de polariteit van deze alcoholen. Daar methanol meer polair is dan ethanol, zal deze eerste sneller oplossen met het polaire water. Het verschil in polariteit tussen de apolaire benzine en het polaire methanol/watermengsel leidt dan tot de separatie. Ethanol is daarentegen wat minder polair en het kleinere verschil in polariteit tussen het ethanol/watermengsel en benzine zorgt bijgevolg ervoor dat een ethanol/benzine mengsel meer water zal kunnen opnemen dan een methanol/benzinemengsel.

## 7.2 Transport

Pijpleidingen worden algemeen aanvaard als de snelste en meest economische manier om vloeistoffen te transporteren. Zo wordt er wereldwijd op deze manier een



Figuur 7.1: Fasediagrammen methanol en ethanol

aanzienlijke hoeveelheid benzine vervoerd van de raffinaderijen naar de eindbestemmingen. Lichte alcoholen zoals (m)ethanol transporteren op deze wijze brengt echter wat problemen met zich mee [78].

Het water en de onzuiverheden die zich in pijpleidingen bevinden blijven op hun plaats wanneer er benzine wordt getransporteerd, deze residuen worden dan met een bepaalde regelmaat gedraineerd uit het systeem. (M)ethanol absorbeert echter dit water met bijhorende onzuiverheden (bv. roestdeeltjes) waardoor de brandstof vervuild raakt en er ook faseseparatie kan optreden. Eens de vervuilingen weg zijn blijft het systeem proper zolang er ethanol aanwezig is. Indien de pijpleiding periodisch wordt gebruikt zullen deze problemen echter blijven terugkomen. Dit vervuilingsprobleem is ook toepasbaar op de huidige benzineopslag tanks die hoogst waarschijnlijk bepaalde residuen bevatten die niet meegenomen worden door benzine, maar wel zullen opgelost worden indien er grotere hoeveelheden alcoholen in de brandstof zullen aanwezig zijn. Dit probleem zal zich dus vooral voor doen in het begin van de overgangperiode naar meer alcoholbrandstoffen. Enkele mogelijke gevolgen hiervan zijn een lichte verkleuring van de brandstof en een tijdelijke verhoging van brandstoffiltervervangingen.

Deze problemen met (m)ethanoltransport worden tegenwoordig opgelost door gebruik te maken van alternatieve transportmogelijkheden. Hoofdzakelijk wordt hier gekozen voor treinen, die door de RFA (*Renewable Fuels Association* [79]) ook in de toekomst als hoofdtransportwijze naar voor wordt geschoven en de 'virtuele pijpleiding' als naam krijgt. Ook trucks en in mindere mate boten worden succesvol gebruikt voor (m)ethanol transport. Men kiest er ook voor om benzine en alcohol zo laat mogelijk bij elkaar te brengen in de transportketen, namelijk net voor ze getransporteerd worden naar de tankstations. Dit om problemen van vervuiling en faseseparatie te vermijden. Tot op het moment van de mengselvorming moet de (m)ethanol (en de co-solventen) zo droog mogelijk gehouden worden in een op-

slagtank. Hiervoor gebruikt men vaak tanks met een vast dak én een drijvend dak, waarbij de ruimte tussen de twee wordt gevuld met stikstofgas als extra bescherming tegen vochtindringing [80].

In de Verenigde Staten heeft men nog een bijkomend transportprobleem. De locatie van de bestaande (petroleum-)pijpleidingen liggen namelijk van de kust aan de Golf van Mexico naar de west- en oostkust. Dit terwijl de ethanol productie zich vooral bevindt in het centrum van het land. Het bouwen van een volledig nieuw pijpleidingsnetwerk zou een grote investeringskost met zich meebrengen.

### 7.3 Materiaalcompatibiliteit

Door het veelvuldig testen en uiteindelijk in gebruik nemen van benzine met kleine hoeveelheden ethanol (E5-E10) heeft men ondervonden dat deze mengsels geen extra vereisten stelden voor het materiaalgebruik bij moderne wagens. Oldtimers en in het bijzonder materialen van de carburator in deze wagens bleken echter toch enige problemen te vertonen bij het gebruik van alcoholen in de brandstof. Deze alcoholgerelateerde corrosieproblemen werden al in een voorgaande thesissen kort aangehaald [5, 3]. Ze concludeerden dat zowel ethanol als methanol zich corrosief gedragen ten opzichte van metalen door hun polariteit en hoge geleidbaarheid. Methanol heeft de grootste polariteit en geleidbaarheid waardoor het ook het meest corrosief is. Deze conclusies worden hier met enkele recente papers aangevuld.

In 2011 onderzocht Baena et al. [81, 82] het corrosiegedrag van veelgebruikte automaterialen bij een E20-mengsel. Zowel metalen als polymeren werden hierbij getest, respectievelijk gedurende 90 en 30 dagen in een bad van E20-mengsel. Ze concludeerden dat koolstofstaal niet gepast was voor constante blootstelling aan E20 door corrosie die niet verminderde in snelheid gedurende lange tijd. Roestvrij staal, aluminium en chroomstaal vertoonden een lage corrosiesnelheid of zelfs geen massaverlies, waardoor deze wel worden geschikt geacht. Op basis van elektrochemische impedantie bepaalden ze voor enkele metalen ook de vatbaarheid voor corrosie. In dalende volgorde gaf dit: koper, koolstofstaal, aluminium, roestvrij staal en tin. Dit bevestigde hun andere testen dat koolstofstaal (en koper) niet direct in aanmerking komen als materiaalkeuze voor alcoholmotoren. Het geval van aluminium werd ook onderzocht door Yoo et al. [83]. Zij ondervonden een stijgende corrosiegraad met toenemend ethanolgehalte. Een viertal veelgebruikte polymeren werden getest door Baena et al., het betreft HDPE (High Density PolyEthylene), POM (Poly-OxyMethylene), PA6GF30 en PA6/6 (polyamiden). Men kon besluiten dat de vier polymeren een massatoename vertoonden die onder de belangrijke grens van 10% lagen. Ook toonden FTIR (*Fourier Transform Infrared Spectroscopy*) testen aan dat

alle polymeren geen verandering in chemische structuur vertoonden. Dit leidde tot hun conclusie dat deze vier polymeren geschikt zijn om te gebruiken in aanwezigheid van E20.

Verder onderzoek naar het corrosief gedrag van brandstoffen met een hoger alcoholgehalte is echter nog vereist. Dit geldt nog in grotere mate voor methanol dan voor ethanol. De testen van Turner et al. [43] zijn hierbij een stap in de goede richting.

Volgens de literatuur [81, 82, 83, 3, 5] zijn alcohol/benzine-mengsels vaak een stuk corrosiever dan pure benzine. Koper corrosietesten (ASTM D130) en natte corrosietesten (ASTM D665) op alle mengsels bevestigden dit echter niet. Zowel benzine als alle mengsels slaagden voor de kopercorrosie test, dit in tegenstelling tot de resultaten van Baena et al. Voor de natte corrosie vond men een opvallend resultaat: de benzine en het D-mengsel bleken corrosief te zijn. Dit terwijl de overige mengsels dit niet bleken te zijn. De natte corrosie test wordt uitgevoerd door een stalen plaatje in een 300 ml mengsel met 30 ml water te leggen bij een constante temperatuur van 40°C. Men vermoedt dat de watertolerantie van de isostoichiometrische mengsels een belangrijke invloed heeft op het resultaat. Men stelde inderdaad vast dat het D-mengsel en benzine de laagste watertolerantie hadden, wat dan leidde tot faseseparatie en bijgevolg ook tot oxidatie tijdens de corrosietest.

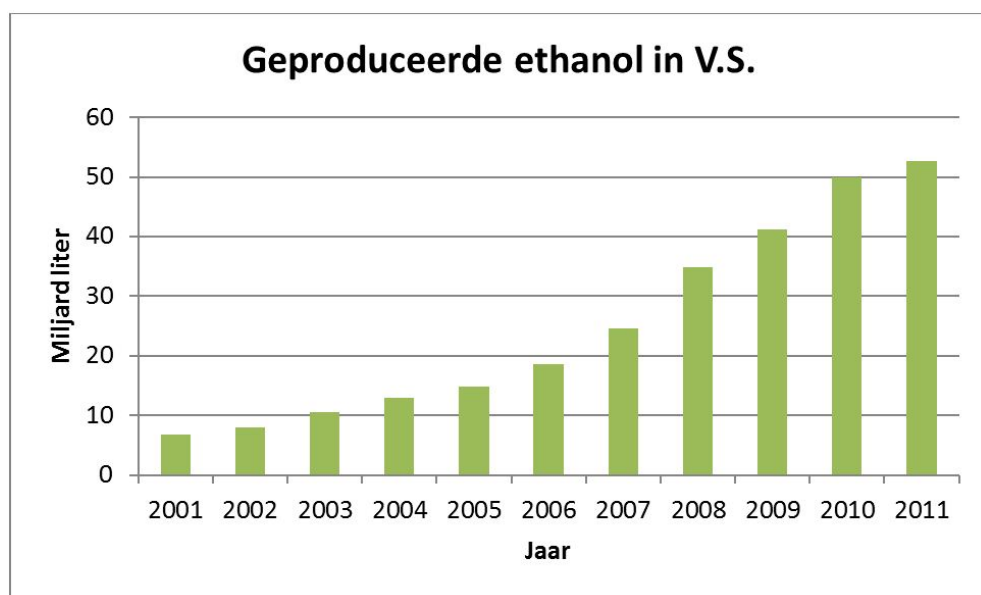
De compatibiliteit van elastomeren is ook al vaak een probleempunt geweest bij het gebruik van alcoholen als brandstof. Dit werd de voorbije jaren o.a. ondervonden door verschillende studenten en technici aan de onderzoeksgroep Vervoertechniek, waarbij het falen van een rubberen afdichting in de brandstofpomp een niet alleenstaand voorbeeld was. Door Turner et al. [43] werden enkele elastomeren getest op hoeveel ze zwellen bij de verschillende mengsels ten opzichte van benzine. Het resultaat was dat alle mengsels behalve A significant meer swelling vertoonden dan benzine. Er was zelf een duidelijke trend van een stijgend percentage swelling met toenemend gehalte aan methanol. Het bijkomend probleem hierdoor is dat een elastomeer dat perfect kan gebruikt worden met een E85-mengsel, plotseling niet meer bruikbaar kan worden als er voldoende ethanol wordt vervangen door methanol en benzine. Dit probleem kan echter opgelost worden door een elastomeer te gebruiken dat gepast is voor de mengsels met het hoogste methanolgehalte. Deze zullen dan uiteraard ook geschikt zijn voor alle andere isostoichiometrische mengsels. Een toenemend gehalte methanol heeft ook een duidelijke invloed op Viton, waardoor het gebruik van dit materiaal afgeraden wordt. Algemeen stelt men ook een maximale swelling van 35% voorop bij het gebruik van polymeren bij brandstoffen voor auto's. In de paper van Turner et al. [43] ziet men dat het toevoegen van grotere hoeveelheden methanol problemen kan veroorzaken. Indien men de dichtingen (gemaakt uit polymeren) te veel laat zwellen riskeert men namelijk lekken en schade te creëren.



Een alternatief dat naar voor wordt geschoven zijn fluorocarbondichtingen, die ook geschikt zijn voor de mengsels met hogere hoeveelheden methanol. Ook hier is nog verder onderzoek vereist op materialen die gebruikt worden in flexfuelvoertuigen. Uiteraard kan men ook gebruik maken van materialen die geselecteerd werden voor M85-voertuigen.

## 7.4 Brandveiligheid

Wereldwijd worden er jaarlijks steeds grotere hoeveelheden bio-ethanol geproduceerd. Daar de Verenigde Staten koploper is in deze productie nemen we dit land als voorbeeld. Figuur 7.2<sup>1</sup> vertelt ons dat er dagelijks miljoenen liters ethanol geproduceerd wordt in de landelijke Midwestern gebieden en dat deze dan moet getransporteerd worden naar de kustregio's. Zoals eerder vermeld gebeurt dit vaak via trein-, truck- of boottransport. De vele (nieuwe) veiligheidsmaatregelen en normen kunnen echter niet voorkomen dat er vroeg of laat eens een incident plaats zal vinden met een ethanoltransport.



Figuur 7.2: Productie ethanol in Verenigde Staten

Helaas zijn er op dit moment onvoldoende brandweer- en reddingsteams die voldoende opgeleid zijn om een ethanolbrand efficiënt te kunnen aanpakken. Deze branden brengen namelijk enkele unieke uitdagingen met zich mee. Om te beginnen kan men brandende ethanol niet eenvoudig blussen met water. Aangezien de ethanol zeer watertolerant is, zal het water opnemen en bijgevolg de brandstofhoeveelheid

---

<sup>1</sup><http://www.bls.gov/>

vergroten. Deze branden moeten dus gesmoord worden met een alcoholresistent schuim (*Alcohol Resistant Aqueous Film Forming Foam*, AR-AFFF). Dit wil ook zeggen dat bestaande brandveiligheidsinstallaties voor benzineopslagplaatsen moeten aangepast worden indien er meer lichte alcoholen gebruikt worden als brandstof. Hier bovenop zullen mengsels met een hoog ethanol percentage (bv. E85) een bijna onzichtbare vlam produceren eens het kleine gedeelte benzine is opgebrand. Ten slotte is de ethanoldamp ook ontvlambaar bij een bredere range aan concentraties dan benzine, wat tot gevolg heeft dat deze damp veel sneller zal ontsteken. Een ongetraind (vrijwilligers-) brandweerkorps in een klein stadje kan zo per ongeluk wel eens de ethanolbrand vergroten door de foute technieken toe te passen.

Al deze voorkomende problemen bij een ethanolbrand gelden ook voor het lichtste alcohol: methanol. Hier is het ook aan te raden om de brand met alcoholresistent schuim te blussen, hoewel het ook zou lukken met water indien er minstens vier maal meer water wordt gebruikt dan de hoeveelheid methanol die aan het branden is [80, 4]. Ook methanol brandt met een blauwachtige vlam die zo goed als onzichtbaar is op een zonnige dag. Om dit probleem te verhelpen onderzoekt men mogelijke additieven om de vlamkleur te wijzigen van pure (m)ethanol. Bij een (m)ethanolbrand in een voertuig zullen echter ook andere materialen aanwezig zijn, die wel een kleur zullen geven aan de vlam en/of een duidelijk zichtbare rookpluim veroorzaken.

Desondanks de net besproken problemen voor methanolbranden (en ethanol), wordt pure methanol toch gebruikt in de racerij en wordt het er beschouwd als een veiligere brandstof dan benzine. Naast de nadelen van een zo goed als onzichtbare vlam en de grote watertolerantie, beschikt methanol ook over enkele voordelen qua brandveiligheid:

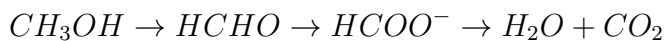
- Lagere vluchtigheid: Onder dezelfde omstandigheden verdampt pure methanol minder snel dan benzine en is er dus minder damp aanwezig om de brand te starten
- Hogere onderste ontvlambaarheidsgrens: Er is een hoger aantal vol% brandstof nodig om methanol te kunnen ontsteken dan bij benzine
- Lagere dampdensiteit: De damp densiteit van methanol is een stuk lager dan bij benzine en ligt niet veel hoger dan de densiteit van lucht. Het verspreidt bijgevolg sneller in de lucht en vormt hierdoor sneller een niet-ontbrandbaar mengsel dan bij de zwaardere benzinedamp
- Lagere warmte vrijstellingssnelheid (*'heat release rate'*): De verschillende eigenschappen die zorgen voor het koelend effect van methanol tijdens de verbranding, zorgen er dus voor dat er met een lagere snelheid warmte wordt vrijgesteld t.o.v. benzine

De hierboven vermelde eigenschappen kan men terugvinden in hoofdstuk 4. Ook ethanol beschikt over een groot deel van deze voordelen voor brandveiligheid.

## 7.5 Gezondheidsproblemen

In een voorgaande thesis [4] werden reeds de veiligheidsrisico's bij het gebruiken van methanol samengevat. Ze gaven een overzicht over de gevolgen bij verschillende situaties zoals: inademing, oogcontact, huidabsorptie en inslikken van methanol. Ze stelden vast dat bij hoge concentraties methanol intoxicatie kan optreden die kan leiden tot blindheid of zelf fataal kan worden. Kleine concentraties veroorzaken echter geen opstapeling van toxische stoffen in het lichaam door een snel metabolisme (chemische reactiesnelheid). Dit kan worden gestaafd door het feit dat mensen constant kleine hoeveelheden methanol opnemen via natuurlijke producten (bv. fruit) of via suikervrije softdrinks (als bijproduct van de omzetting van aspartaam).

Burbacher et al. [84] bevestigden dit in hun onderzoek naar de effecten van langdurige blootstelling aan methanoldampen bij primaten. Zij stelden vast dat het herhaaldelijk in contact komen met methanoldamp concentraties van 1800 ppm er niet voor zorgde dat de niveaus van schadelijke stoffen boven bepaalde grenzen kwamen. Deze studie werd echter gedaan in de jaren '90 en ondertussen heeft men vastgesteld dat de radicale stoffen die optreden bij de omzetting van methanol naar  $H_2O$  en  $CO_2$  carcinogeen kunnen zijn. Het meest besproken element hierbij is formaldehyde die gevormd wordt door de oxidatie van methanol. Hierop volgt een volgende oxidatie tot een formiaat anion, waarbij deze twee eerste reacties aan hoge reactiesnelheid doorgaan waardoor er slechts een kleine kans is voor opstapeling van formaldehyde in het lichaam. De derde reactie is de traagste en wordt door enzymen gestuurd in de lever, in aanwezigheid van tetrahydrofolaat.



Ook Williams et al. [85] stelden vast dat er een verhoogde formaldehyde uitstoot was bij toenemend methanol gehalte in de brandstof. Hiervoor werden testen uitgevoerd op verschillende flexfuelmotoren en een toegewijde methanolmotor. Alle motoren vertoonden een gelijkaardige verdeling van het percentage formaldehyde op de totale hoeveelheid uitgestoten koolwaterstoffen. Deze studies gingen echter ook door in de jaren '90, wanneer de emissies in het algemeen een stuk hoger lagen dan bij de huidige voertuigen.

In 2003 kwamen Cushing et al. [86] tot de verrassende conclusie dat MTBE een beter zuurstofadditief is dan ethanol op basis van vergelijkingen in luchtkwaliteit en

geproduceerde contaminanten. Ze stelden vast dat beide additieven dezelfde luchtkwaliteit vertoonden, maar dat ethanol echter minder goed uit de testen kwam op vlak van mogelijke contaminanten. Men maakte de hypothese dat ethanol een groter gevaar was voor gezondheidsproblemen in het geval van vervuiling van grondwater, terwijl MTBE hier slechts een slechte geur en smaak zal veroorzaken. De effecten op lange termijn zijn echter nog nooit vastgesteld voor ethanol, waardoor dit slechts louter een hypothese blijft. Deze paper maakt ons duidelijk dat het onderzoek naar alcoholen als alternatieve brandstof niet enkel gericht moet worden op bepaalde waarden (zoals opgelegde emissienormen), maar dat het totale plaatje moet kloppen. In dit specifieke geval moet men dus gaan kijken wat meer doorweegt: een kleine groep die kans maakt op gezondheidsrisico's van vervuild drinkwater of de verbetering van de algemene luchtkwaliteit. Zoals al vaker opgemerkt, ontbreken hier ook grootschaligere testen op lange termijn.

Het probleem van de carcinogene formaldehyde wordt ook aangehaald in de Methanol Economy [6], hierin vermelden ze echter een grote evolutie van de katalysatoren waardoor het probleem sterk geminimaliseerd wordt. McCabe en Mitchell [87] deden in 1988 al onderzoek naar verschillende katalysatorproducten voor de oxidatie van formaldehyde afkomstig van methanolwagens. Zij concludeerden dat de beste conversie gedaan werd bij een katalysator uit aluminiumoxide met 0,05 massaprocent platina. Deze testen werden uitgevoerd bij uitstoot van zeer arme methanol/luchtmengsels. De arme omstandigheden hadden tot gevolg dat er weinig CO aanwezig was in de uitstoot, bij een grotere concentratie CO zag men echter een significante daling van deze snelheid. Zhang et al. [88] onderzochten in 2006 de invloed van het doperen van titaniumoxide ( $\text{TiO}_2$ ) katalysatoren met edele metalen. Ook hier stelden ze vast dat platina (1 m%) een uitstekende invloed heeft op het oxideren van formaldehyde. Bij de testen werden de katalysatoren doorstroomd met een zuurstof/helium-mengsel (20 vol% zuurstof) dat 100 ppm formaldehyde bevatte. Er werd een volledige conversie vastgesteld op kamertemperatuur bij een GHSV (*Gas Hourly Space Velocity* = volumesnelheid van reactant per reactor volume) van 50.000 per uur. Bij 100.000 per uur werd een conversie van ongeveer 95% opgemeten. Zo blijkt dus dat het oplossen van het formaldehyde probleem vooral afhankelijk is van de katalysatorproducenten, zij zullen een belangrijke rol spelen in de overgang naar een alcoholgebaseerde transportindustrie.

Deel II

**Experimenteel**

## Hoofdstuk 8

# Waterhoudende ethanol

Uit hoofdstuk 2 kon besloten worden dat een significant economisch voordeel kan bekomen worden door toepassen van minder verregaande droging van ethanol. Eerder werk op methanol [3] wijst uit dat een beperkte waterconcentratie in lichte alcoholen zowel onvermijdbaar als voordelig kan zijn. In dit hoofdstuk wordt gekeken of deze conclusie ook geldt voor de prestaties en emissies van waterhoudend ethanol. Gezien de eigenschappen van lichte alcoholen besproken in hoofdstuk 4 worden gelijkaardige resultaten verwacht. Deze verwachting wordt nog versterkt door eerder onderzoek naar de invloed van waterinhoud in ethanol-watermengsels [13, 15]. Uitsluitel wordt bekomen door uitvoeren van experimenten op de Volvo-proefstand.

### 8.1 Verwachtingen

Voor een uitgebreide bespreking van alle verwachte invloeden van lichte alcoholen op de resultaten wordt verwezen naar het volgende hoofdstuk 9. In onderstaande wordt voor een goed begrip van de verdere uiteenzetting van de resultaten de focus gelegd op de substantiële invloed bij het toevoegen van water aan de brandstof op prestaties en emissies. Zoals kon worden afgeleid uit de literatuur in hoofdstuk 4 bestaan de voornaamste voordelige eigenschappen van lichte alcoholen uit:

- Hoge latente verdampingswarmte en specifieke warmtecapaciteit, wat zorgt voor een vergroot koeffect
- Verhoogde klopresistentie mede dankzij dit koeffect
- Hoge vlamsnelheden

Tabel 8.1 geeft enkele eigenschappen van de gebruikte ethanol-watermengsels die voor het gemak benoemd worden als EXWY. Hierbij is X het volumetrische percentage ethanol in het mengsel en Y de waterinhoud op volumetrische basis. Deze

eigenschappen zijn zowel nuttig in de bespreking van de verwachte resultaten als de verwerking van de experimentele data.

Eigenschap	E100	E95W5	E90W10	E80W20
Water in brandstof [mol%]	0	14.55	26.44	44.72
Water in brandstof-luchtmengsel [mol%]	0	1.1	2.3	5.0
Water [m%]	0	6.24	12.32	24.03
Mol. massa [g/mol]	46.07	41.99	38.65	33.52
LHV [kJ/kg]	26950	25268	23628	20474
AFR <sub>stoich</sub> [kg lucht/kg brandstof]	8.95	8.39	7.84	6.80
$\rho_{\text{damp}}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	2.06	1.87	1.72	1.50
$\Delta h_{\text{vap}}$ [kJ/kg]	838	927	1013	1180

Tabel 8.1: Eigenschappen van verschillende waterhoudende ethanolmengsels

## Prestaties

Het toevoegen van water zal het genoemde koeffect op twee manieren verder versterken. De latente verdampingswaarde van water is nog groter dan die van ethanol, terwijl ook de stoichiometrische AFR verlaagd wordt en dus in totaal een significante stijging van de latente verdampingswarmte bekomen wordt.

Gezien de hogere specifieke warmtecapaciteit van water kan de compressie van waterhoudende ethanol meer isotherm verlopen. Dit effect resulteert in een verlaagde compressiearbeid en beïnvloedt dus het effectief rendement in positieve zin.

Voor de mengsels met een lage waterinhoud wordt een vermogensstijging verwacht door een verbeterd volumetrisch rendement met dank aan het koeffect. Hoe hoger de waterconcentratie echter wordt, hoe meer de dalende LHV van de brandstof de vermogensoutput zal kunnen penaliseren.

Het koeffect bij waterhoudende ethanol en ook een verlaagde adiabate vlamtemperatuur zullen zorgen voor een lagere piektemperatuur in de cilinder. Dit heeft ook een rendementsstijging tot gevolg door het verminderen van de warmteverliezen.

Een rechtstreeks gevolg van het hiervoor besproken koeffect is de verhoogde klopresistentie die ook enkele gunstige gevolgen met zich meebrengt voor de prestaties van de motor. Het uitstellen van klopgedrag laat toe de MBT vaker te bereiken, al is dit voor deze proefopstelling geen probleem (zie verder). Bij nieuw motorontwerp kan op deze manier wel een hogere compressieverhouding gekozen worden en dit zorgt in combinatie met downsizing voor verdere prestatieverhoging.

De verhoogde vlamsnelheid van ethanol ten opzichte van benzine zorgt voor een meer isochore verbranding. Het toevoegen van een bepaalde concentratie water zal naar grote waarschijnlijkheid een verlaging van deze vlamsnelheid tot gevolg hebben met een vertraagde en minder isochore verbranding tot gevolg. Hierdoor verlaagt het rendement en moet de ontstekingstiming vervroegd worden om MBT te bereiken. Dit heeft dan weer zijn gevolgen voor de emissies, zoals in de volgende paragraaf besproken wordt.

### **Emissies**

Drie zaken beïnvloeden de vorming van  $\text{NO}_x$  in belangrijke mate: de piektemperatuur in de cilinder, de verblijfsduur van de uitlaatgassen in de cilinder en de aanwezigheid van een zuurstofovermaat. Deze laatste factor kan theoretisch gezien geen invloed hebben bij deze experimenten aangezien alle metingen stoichiometrisch werden uitgevoerd ( $\lambda = 1$ ). Het toevoegen van water heeft twee tegenwerkende effecten op de andere factoren. Het vertraagde verbrandingsproces en daaruit volgende vervroegde ontstekingstiming kunnen een grote invloed hebben op de verblijfsduur van de verbrandingsgassen in de cilinder aan een hoge temperatuur. Hiermee kan een hogere vorming van  $\text{NO}_x$  verwacht worden. Daartegenover staat dat het koel-effect en de lagere adiabate vlamtemperatuur zullen instaan voor een daling van de  $\text{NO}_x$ -emissies. Met de resultaten van de experimenten op methanol-watermengsels in gedachten wordt verwacht dat het temperatuurseffect de dominante factor zal zijn en er dus een sterke daling met toenemende waterinhoud zal verkregen worden.

Zoals voordien reeds gezegd zal de verbranding trager en minder isochoor verlopen naarmate de waterinhoud in de brandstof toeneemt. Verder wordt aangenomen dat deze verbranding minder compleet zal zijn en dus zal resulteren in een verhoogde uitstoot van onverbrande alcoholen en CO. [89] Deze negatieve invloed kan ook aan belang winnen wanneer rekening gehouden wordt met een verhoogde vatbaarheid voor vlamuitdoving door onder andere een dikkere quenchlaag bij condenseren van waterdamp op de cilinderwand. Ook hier heeft de verlaagde uitlaattemperatuur een invloed, namelijk een daling in dissociatiereactiesnelheid van  $\text{CO}_2$  naar CO.

Deze dissociatiereactie is volgens de verwachting de enige rechtstreekse invloed van de aanwezigheid van water op de  $\text{CO}_2$  uitstoot. Verder worden slechts beperkte verschillen verwacht tussen de verschillende mengsels waarbij het effectieve rendement de meest significante invloed kan hebben op de specifieke uitstoot.



## 8.2 Volvo proefopstelling

Het merendeel van de metingen in deze master thesis werd uitgevoerd op de Volvo-proefstand die zich in de machinehal van het Technicum van de Universiteit Gent bevindt. Deze proefstand bestaat uit een productiemotor die aangepast is voor werking op benzine, waterstof en alcoholen. Voor details betreffende de hardware wordt verwezen naar de thesis van Sileghem en Van De Ginste [5], en voor de sturing en data-acquisitie naar het eindwerk van Reynvoet [90]. De specificaties van de proefstand worden gegeven in tabel 8.2.

Cylinders	4 (L)
Kleppen	16
Boring	83.0 mm
Slag	82.4 mm
Slagvolume	1783 cc
Compressieverhouding	10.3:1
Injection	PFI
Max. toerental	6000 (continu)
Nokkenas	DOHC met CVVT
ECU	Motec M800

Tabel 8.2: Motor eigenschappen Volvo

### 8.2.1 Meetprocedure

De meetset wordt ontworpen met het oog op een evenwicht tussen enerzijds het verbruik van de beschikbare hoeveelheid ethanol en anderzijds de mogelijkheid tot vormen van significante conclusies wat betreft invloed van belasting en toerental. Er wordt gekozen voor een gemiddelde en middelhoge belasting van 40 en 80 Nm, waarbij het brandstofverbruik een beperking legt op de hoogst gekozen belasting. Drie toerentallen relevant voor standaard motorgebruik in passagiersvoertuigen worden opgelegd bij deze belastingen, zie tabel 8.3 voor de samenvatting van ontwerp van deze meetset.

$\lambda$	Koppel [Nm]	BMEP [bar]	Toerental [rpm]
1	40	2.819	1500, 2500, 3500
1	80	5.638	1500, 2500, 3500

Tabel 8.3: Overzicht meetpunten

Een verdere afweging om het verbruik van het ethanol te drukken is het beperken van de tijd per meting. Een meting van 3 minuten in steady state toestand is voldoende om een stabiele uitlezing op de meetapparatuur te garanderen en de fouten op de meting en bijhorende foutvlaggen aanvaardbaar te houden.

De belasting wordt geregeld door middel van een drive-by-wiregasklep terwijl stoichiometrische werking verzekerd wordt met het instellen van de injectiehoeveelheid in de motormap in Motec. Daarbij wordt per meetpunt de ontstekings timing op MBT ingesteld. Gezien de stoichiometrische werking en beperkte belastingen wordt geen klop geconstateerd. De beperkte compressieverhouding van de Volvo-opstelling zorgt er zelfs voor dat dit voor het volledige motorbereik geldt. Bij experimenten op de Audi-proefstand zal dan gekeken worden naar de invloed van brandstoffen op het klopgedrag. Er wordt voor alle meetsets stoichiometrische werking gekozen om de conversiegraad van de driewegkatalysator te maximaliseren.

### **8.3 Resultaten**

De gebruikte ethanol-watermengsels en enkele van hun eigenschappen werden reeds weergegeven in tabel 8.1. Er wordt gekozen voor pure ethanol E100, en mengsels met een volumetrische waterinhoud van 5, 10 en 20 vol%. Deze keuze is gebaseerd op de literatuurstudie (zie hoofdstuk 2) die aangeeft dat een minder doorgedreven dehydratatie van ethanol een grote reductie van productiekost kan inhouden en dus een belangrijk economisch voordeel oplevert. Met een waterconcentratie van 5 vol% kan de laatste (en kostintensieve) destillatiestap van het azeotrope mengsel overgeslaan worden. De maximale waterconcentratie van 20 vol% stemt overeen met het punt waarbij de productiekost een exponentiële stijging kent bij verdere droging. Nog hogere concentraties water in de ethanol-watermengsels houden een minder beduidende kostreductie in terwijl de nadelige gevolgen voor BSFC (hiermee gepaard rijbereik van een wagen) en verbrandingsvolledigheid sterker beginnen doorwegen dan de voordelen. Het laatste mengsel met 10 vol% water ligt dan tussen deze twee mengsels om optimaal de evolutie van de resultaten te kunnen bestuderen in functie van de waterconcentratie.

#### **8.3.1 Vergelijking van één werkingspunt**

Er wordt een uitvoerige bespreking gegeven van de resultaten van 1 werkingspunt waarna gekeken wordt naar de invloed van toerental- en belastingsvariatie in de volgende paragraaf. Tabel 8.4 geeft de voornaamste resultaten van de meting bij 40 Nm en 2500 rpm. De berekening van de grootheden en bijhorende foutenanalyse is te vinden in bijlage C. Alle resultaten van de metingen zijn te vinden in bijlage D.

Eigenschap	E100	E95W5	E90W10	E80W20
$\lambda$ [-]	1	1	1	1
MBT [ $^{\circ}$ ca BTDC]	26	26	27	32
Gasklepstand (TP) [%]	19.6	19.6	19.9	19.7
Luchtstroom (MAF) [g/s]	14.25	14.33	14.22	14.25
Inlaattemperatuur [ $^{\circ}$ C]	28.0	25.5	25.4	24.9
Uitlaattemperatuur [ $^{\circ}$ C]	674.7	672.4	669.8	662.5
$\eta_{\text{eff}}$ [%]	24.56	24.54	24.74	24.64
$\delta\eta_{\text{eff}}$ [%]	0.4	0.4	0.4	0.4
BSFC [g/ekWh]	543.87	580.51	615.76	713.52
$\delta BSFC$ [g/ekWh]	8.6	9.2	9.7	11.1
$\eta_{\text{vol}}$ [%]	34.49	35.25	35.28	36.06
$\delta\eta_{\text{vol}}$ [%]	0.9	0.9	0.9	0.9
NO <sub>x</sub> [g/ekWh]	12.18	10.23	8.28	6.29
$\delta NO_x$ [g/ekWh]	0.5	0.5	0.4	0.4
CO <sub>2</sub> [g/ekWh]	1017.05	1015.84	1004.25	1007.51
$\delta CO_2$ [g/ekWh]	27.5	27.9	27.4	27.2
CO [g/ekWh]	16.32	17.66	19.66	20.29
$\delta CO$ [g/ekWh]	8.5	8.8	8.6	8.5

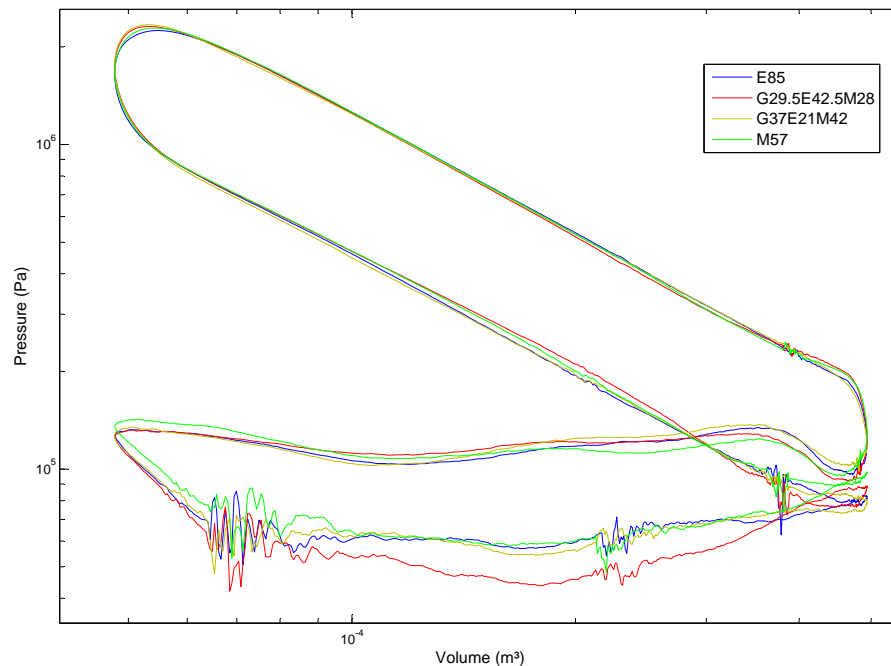
Tabel 8.4: Vergelijking verschillende ethanol/watermengsels bij 40 Nm en 2500 rpm

### Prestaties

De MBT-timing wordt duidelijk beïnvloed door de aanwezigheid van water in de brandstof, met een uitschieter van 32  $^{\circ}$ ca BTDC voor het mengsel met 20 vol% water. Deze ontstekingsvervroeging is noodzakelijk gezien de vlamsnelheid die lineair volgens stijgend molair<sup>1</sup> waterpercentage daalt (en dus benaderend kwadratisch met volumepercentage). De verbranding verloopt zoals verwacht dus steeds trager en minder isochoor, zoals ook af te leiden is uit het drukverloop in figuur 8.1. Hier is het duidelijk dat de verbranding bij E80W20 het sterkst onder dit effect te lijden heeft. Dit alles heeft zijn effect op het effectieve rendement en zoals verder besproken ook op de emissies.

Dit effectieve rendement is veruit de belangrijkste prestatieparameter van een motor wanneer deze enkel met variërende brandstofsamenstelling in steady state getest wordt. Op basis van de 4 waarden in tabel 8.4 voor de meting bij 2500 rpm en 40 Nm kunnen geen significante verschillen toegewezen worden aan de verschillende mengsels. De grootste afwijking tussen de effectieve rendementen is kleiner dan de experimentele fout voor deze grootte.

<sup>1</sup>berekend over het lucht-brandstofmengsel



Figuur 8.1: Loglog PV-diagram bij 40 Nm en 2500rpm

De status quo van het effectieve rendement bij stijgend waterpercentage bij dit ene werkingspunt is te wijten aan enkele tegenstrijdige effecten die ook opgemerkt werden bij de experimenten op methanol-watmengsels [3]. De eerder besproken rendementsdaling door de verlaagde vlamsnelheid en minder isochore verbranding wordt gecompenseerd door lagere warmteverliezen die te wijten zijn aan een stijgend koeffect bij hogere waterinhoud. De waterhoudende mengsels zorgen met hun hoge latente verdampingswarmte en hoge specifieke warmtecapaciteit voor een verlaagde adiabate vlamtemperatuur en meer isotherme compressie waardoor de piektemperaturen in de cilinder gereduceerd worden.

Eerder genoemde hoge latente warmte en specifieke warmtecapaciteit bij stijgende waterinhoud heeft tot gevolg dat bij volledige verdamping van de brandstof bij inspuiten op de inlaatklep de inlaatlucht meer gekoeld wordt. Deze lading zal dus een hogere dichtheid hebben en er wordt een betere vulling met meer massa in de cilinder bekomen. Doordat bij stijgende waterconcentratie meer brandstof dient ingespoten te worden bij gelijkblijvende luchthoeveelheid om hetzelfde vermogen te genereren zal dit fenomeen nog verder versterkt worden. Een derde gevolg van de verlaagde inlaattertemperatuur en verhoogde dichtheid van het mengsel bij inlaat is een lagere stromingssnelheid voor het massadebiet waardoor de ladingsverliezen over de

inlaatklep en door de stroming gereduceerd worden. Al deze effecten resulteren zoals te zien is in tabel 8.4 in een significante stijging van het volumetrische rendement. Terwijl hier de foutvlaggen ook overlappen zal er in de volgende paragraaf bij het bestuderen van de invloed van toerental en belasting gezien worden dat er zich constante trends voordoen en het verschil dus als fysisch relevant kan bestempeld worden.

Zoals zal blijken uit de volgende discussie (zie figuur 8.3) beperken de praktische nadelen bij het gebruik van waterhoudende ethanol zich tot een verhoogde BSFC. Dit is logisch aangezien de LHV van de mengsels daalt met stijgende waterinhoud, zie hiervoor ook tabel 8.4. Het feit dat de effectieve rendementswinst beperkt of onbestaand is zorgt ervoor dat met eenzelfde volume brandstof de actieradius van het voertuig sterk vermindert. Dit effect wordt in beperkte mate tegengewerkt doordat de som van de volumes van de componenten van het mengsel meer bedraagt dan het volume van het mengsel zelf, dit doordat de moleculen van ethanol en water zich in een compactere configuratie schikken bij het mengen.

### **Emissies**

De emissies van onverbrande koolwaterstoffen werden niet opgemeten aangezien de FID (*Flame Ionization Detector*) in de analysekast een onwerkbare reactietijd heeft voor zuurstofhoudende koolwaterstoffen zoals onverbrande ethanol of acetaldehyde. Het gebruik van deze detectoren zou hoogstwaarschijnlijk leiden tot een onderschatting van de totale onverbrande koolwaterstoffen, ook gezien de opname van acetaldehyde in het condensatiewater. Deze emissies worden zoals besproken in de literatuurstudie (zie sectie 4.3.2) nochtans vaak vastgesteld in de uitlaatgassen bij motorwerking op ethanol.

Om een gemakkelijke vergelijking met gelijkaardige experimenten op andere motorproefstanden toe te laten worden de hieronder besproken emissies weergegeven in gram per effectieve kilowattuur [g/ekWh].

In de sectie prestaties werd reeds vermeld dat de ontstekingstiming vervroegd dient te worden om MBT-timing te bekomen bij stijgende waterinhoud in de mengsels en dit door de verminderde vlamsnelheid. Hierdoor worden twee parameters beïnvloed die een negatief effect hebben op de NO<sub>x</sub>-emissies: een verlengde verblijfsduur en een verhoogde piektemperatuur. Het koeffect door het toevoegen van water zorgt er echter voor dat de piektemperatuur in de cilinder significant lager zal zijn. Uit de waarden in tabel 8.4 mag het duidelijk zijn dat dit effect dominant zal zijn en er dus een sterke daling van NO<sub>x</sub>-emissies geconstateerd wordt. Door het extreem hoge verschil in MBT-timing voor de meting bij E80W20 zal de NO<sub>x</sub>-emissie minder dalen dan verwacht op basis van de waterconcentratie van dit mengsel.

Zoals verwacht vertoont de CO-emissie door verminderde volledigheid van verbranding bij hogere waterinhoud van de ethanol-watermengsels een stijgende trend. De zeer grote foutvlag op deze emissiemeting dwingt ons echter om dit resultaat wetenschappelijk insignificant te verklaren. In de volgende paragraaf zal ook duidelijk worden dat de meest relevante trends onder invloed van toerental en belasting te zien zijn.

De CO<sub>2</sub>-uitstoot vertoont zo goed als geen variatie in functie van de mengselsamenstelling, de vier punten in tabel 8.4 vallen volledig binnen elkaars foutvlag. Dit is volledig volgens de verwachting aangezien voor deze meetpunten de effectieve rendementen een gelijkaardige minieme afwijking vertonen.

Voor zowel de CO-emissie als de CO<sub>2</sub>-uitstoot vertonen de resultaten een tegenovergestelde trend dan verwacht op basis van het effect op de dissociatiereactie voor deze emissie. Het wordt dan ook weinig waarschijnlijk geacht dat de invloed van deze dissociatie groter zal zijn dan de experimentele fout op deze metingen, in het bijzonder bij de CO-emissies. Dit effect wordt in verdere besprekingen bijgevolg buiten beschouwing gelaten.

### 8.3.2 Evolutie met toerental en belasting

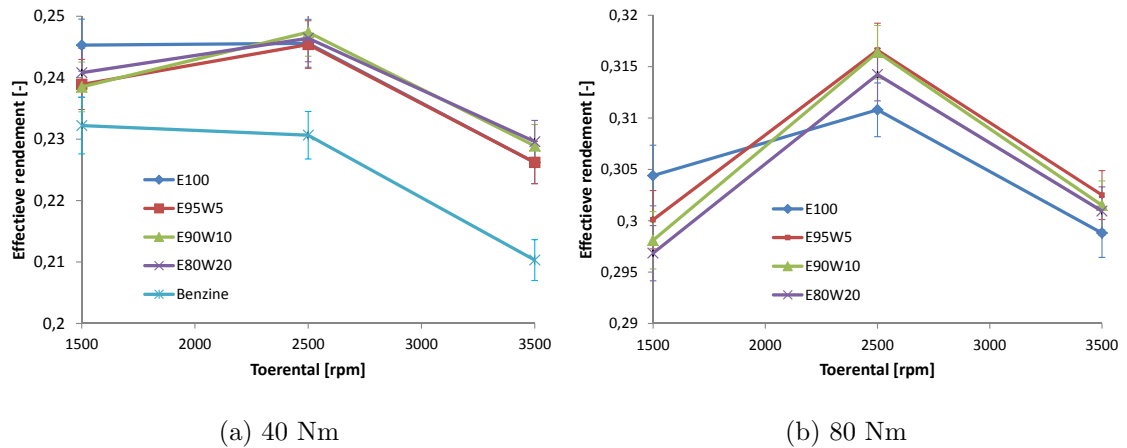
Er wordt verwacht dat toerental en belasting voor bepaalde eigenschappen de verhouding van de resultaten per mengsel significant zal beïnvloeden. In de onderstaande uiteenzetting kijken we naar deze variaties en wordt gepoogd deze te verklaren. De volledige meetresultaten zijn te vinden in bijlage D en de prn-bestanden met drukmetingen zijn te vinden op bijgevoegde DVD.

#### Prestaties

Zoals gezegd in paragraaf 8.1 worden slechts beperkte verschillen verwacht voor het effectieve rendement bij de verschillende ethanol-watermengsels. In het reeds besproken punt van 2500 rpm en 40 Nm is dit inderdaad het geval zoals ook duidelijk te zien is op figuur 8.2. Dit is opmerkelijk aangezien de mengsels met 10 vol% (26,44 mol%) en 20 vol% (44,72 mol%) toch een aanzienlijke hoeveelheid water bevatten. Zodoende wordt voor alle mengsels een rendementswinst van 1 à 2 procentpunt bekomen ten opzichte van benzine (Euro95). Deze winst werd verwacht en valt te verklaren aan de hand van een verhoogde vlamsnelheid en dus meer isochore verbranding gecombineerd met verminderde warmteverliezen door lagere temperaturen in de cilinder. De prestaties en emissies voor alcoholen ten opzichte van benzine worden nog verder in detail uitgewerkt in hoofdstuk 9.

Uit figuur 8.2 blijkt ook dat de enige significante afwijking tussen de mengsels zich

bij 1500 rpm bevindt en dit in de vorm van een hoger effectief rendement voor pure ethanol. Ook bij de hogere belasting van 80 Nm is deze trend duidelijk op te merken. De verklaring hiervoor is te vinden bij de verlaagde laminaire vlamsnelheid van waterhoudende ethanol. Bij laag toerental penaliseert dit effect het effectieve rendement, waarbij de waterinhoud slechts een beperkte invloed heeft. Bij hoog toerental ontwikkelt zich een sterke turbulentie in de inlaatstroming waardoor de negatieve invloed van de verlaagde laminaire vlamsnelheid sterk gereduceerd wordt.



Figuur 8.2: Effectieve rendement bij verschillende belastingen

Bij lage belasting en de hogere toerentallen houden bij alle waterhoudende mengsels het negatieve effect van de minder isochore verbranding en de positieve invloed van het verhoogde koeffect elkaar in evenwicht. Bij 3500 rpm is de rendementswinst ten opzichte van conventionele benzine het hoogst door dit koeffect geïnduceerd door het al dan niet waterhoudende alcohol. Bij de belasting van 80 Nm hebben de verminderde warmteverliezen duidelijk een prominentere invloed op het effectieve rendement bij de hogere toerentallen. Uit figuur 8.5 kan opgemaakt worden dat de uitlaattemperaturen bij de hoge belasting dan ook lager liggen dan bij de belasting van 40 Nm. Er wordt in functie van de waterconcentratie een soortgelijke trade-off vastgesteld als bij lage belasting, waarbij de mengsels E90W10 en E95W5 echter door optimaal gebruik te maken van het koeffect in het toerentalgebied 2000-3500 een beter effectief rendement laten optekenen. Een waterconcentratie van 20 vol% (of hoger) zal dan zwaarder gepenaliseerd worden door de minder isochore verbranding door de verlaagde vlamsnelheid in het geteste toerentalbereik.

Over het algemeen zijn de effectieve rendement bij de hogere belasting een significante 5 à 7%pt hoger mede door de verlaagde warmteverliezen. De voornaamste reden voor deze stijging is echter het verhogen van het mechanische rendement. De mechanische wrijvingsverliezen (FMEP) zijn zo goed als onafhankelijk van de belas-

ting en hun relatieve invloed verkleint dus bij het verhogen van de belasting. Ook zijn de pompverliezen (PMEP) lager bij hoge belasting door verder openen van de gasklep. Hiermee wordt de onderdruk in het inlaatspruitstuk minder bepalend en de ladingsverliezen over deze klep dus verminderd. Dit effect wordt echter in beperkte mate tegengewerkt door de hogere ladingsverliezen die gegenereerd worden door het grotere volumetrisch stromingsdebiet.

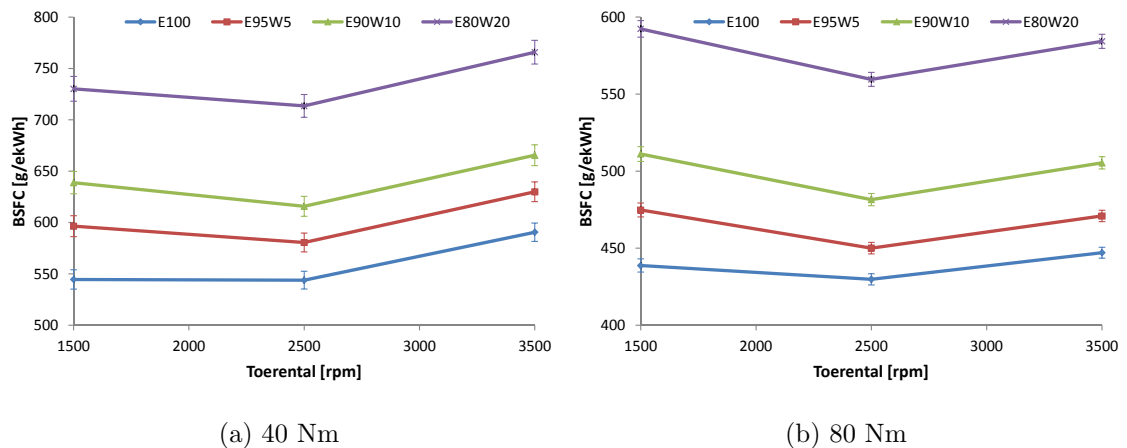
Voor iedere meting wordt een optimum effectief rendement opgemeten bij gemiddeld toerental waarna bij hoger toerental opnieuw een daling geconstateerd wordt. Hierbij spelen meerdere effecten een rol:

- De stromingsverliezen verhogen aangezien de lucht- en brandstofstroming moeten toenemen om bij stijgend toerental eenzelfde belasting te kunnen aanhouden.
- Om deze verhoogde stroming te bekomen dient de gasklep verder geopend te worden. Dit zal dan weer een positief effect hebben op de totale ladingsverliezen. Dit effect weegt zwaarder door dan de eerst vermelde stromingsverliezen waardoor bij hoger toerental het geïndiceerde rendement een stijging zal kennen.
- De voornaamste reden voor het dalen van het effectieve rendement is echter het sterk verlaagde mechanische rendement. Dit is op eenvoudige manier te verklaren met het toenemen van de wrijvingsverliezen bij hoger toerental
- Het laatste effect is het verminderen van de relatieve warmteverliezen bij stijgend toerental. De absolute warmteverliezen stijgen dus wel degelijk maar minder dan lineair met het toerental, zoals ook af te leiden valt uit de niet-lineaire relatie te zien op figuur 8.5.

Gezien de eerder beperkte invloed van de waterinhoud op het effectieve rendement is het logisch dat het effect hiervan op de BSFC ook verwaarloosbaar klein zal zijn. Door het toevoegen van water aan de brandstof verlaagt de LHV echter wel. Dit houdt in dat er meer brandstofmengsel zal moeten ingespoten worden om eenzelfde vermogen te kunnen leveren. Hieruit volgt een aanzienlijke stijging van de BSFC zoals te zien op figuur 8.3. Dit betekent dat voor hetzelfde voertuig met een volle tank er een grotere afstand kan afgelegd worden met het mengsel met lagere waterconcentratie. In navolging van het effectieve rendement zal de BSFC dalen bij hogere belasting en een minimum bereiken bij een gemiddeld toerental.

Het volumetrisch rendement wordt gedefinieerd als de verhouding van het volume lucht en brandstof dat de cilinder binnenkomt tot het volume dat geometrisch beschikbaar is. Figuur 8.4 vertoont duidelijk een trend in functie van de waterinhoud





Figuur 8.3: Specifiek brandstofverbruik bij verschillende belastingen

in het mengsel, ook al is er voor de meeste mengsels een overlapping van de foutvlaggen. Dit verschil in volumetrisch rendement is niet te wijten aan de gaskleppositie aangezien deze zo goed als mengselonafhankelijk is (zie ook tabel 8.4). Zoals reeds voordien gezegd is de LHV en AFR van de waterhoudende alcoholen lager waardoor een hogere massa brandstof moet worden ingespoten bij eenzelfde luchthoeveelheid en er dus een betere vulling bekomen wordt.

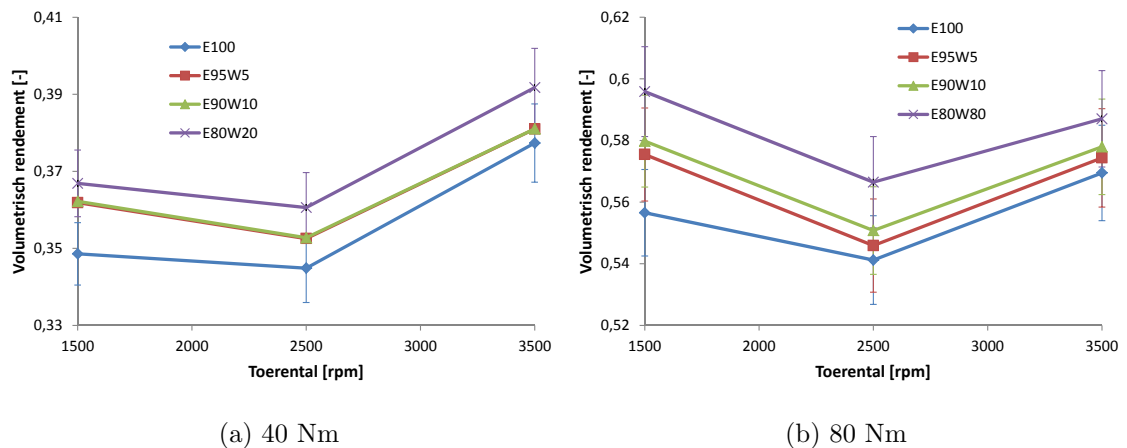
Deze toegenomen massa heeft ook een hogere latente warmte en specifieke warmtecapaciteit waardoor de inlaatstroming afgekoeld wordt en de densiteit stijgt. Dit heeft ook een positief effect op de leveringsgraad aangezien er zo een grotere massa in het volume van de cilinder kan worden ondergebracht. Ook zal het volumetrische debiet met stijgende densiteit verlagen waardoor de ladingsverliezen ook gereduceerd worden.

Het minimum in de leveringsgraad bij 2500 rpm kan verklaard worden aan de hand van het effectieve rendement dat een analoge maar omgekeerde trend volgt. Het verhoogde rendement zorgt voor een lagere vraag naar lucht-brandstofmengsel en dus dient de gasklep wat meer gesloten te worden waardoor er een minder goede vulling van de cilinder bekomen wordt.

## Emissies

In deze paragraaf wordt het verloop van de emissies in functie van belasting en toerental verder onder de loep genomen. Hierbij wordt de voornaamste invloed geconstateerd bij de  $\text{NO}_x$ -emissies waardoor de bespreking van deze component ook het meest uitgebreid zal zijn.

Figuur 8.5 geeft zowel de resultaten voor de ontstekingstiming bij MBT-timing, de

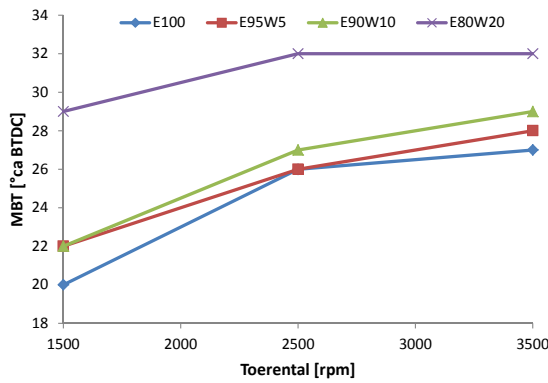


Figuur 8.4: Volumetrisch rendement bij verschillende belastingen

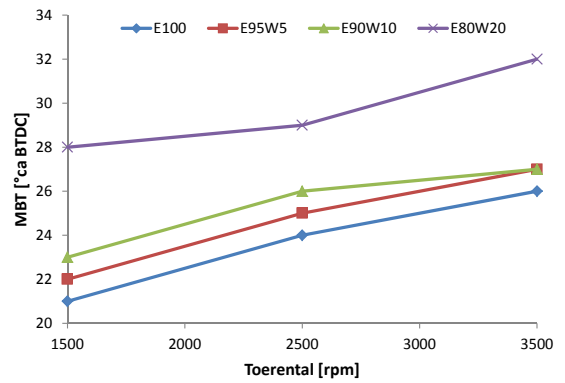
gemiddelde uitlaattemperatuur als de  $\text{NO}_x$ -emissies voor beide belastingen. De eerste twee grootheden zijn dan ook toonaangevende factoren die een sterke invloed hebben op de  $\text{NO}_x$ -emissie. De MBT-timing geeft aan hoeveel het ontstekingstijdstip moet vervroegd worden om het maximale koppel te bereiken voor de huidige motorinstelling. Dit heeft dus een grote invloed op de verblijftijd van de verbrandingsproducten in de cilinder en dus op zijn beurt op de  $\text{NO}_x$ -emissie. De piektemperatuur in de cilinder is zoals gezegd in de bespreking van één werkingspunt de dominante factor voor de aanmaak van  $\text{NO}_x$  en de gemiddelde uitlaattemperatuur is dus een goede indicator van hoe deze piektemperatuur verloopt met toerental en belasting. Een derde factor die een invloed heeft op de  $\text{NO}_x$ -emissies is de lucht-overmaat maar gezien alle metingen onder stoichiometrische condities uitgevoerd worden zou deze geen invloed mogen hebben, hierover echter verder meer.

De laminaire vlamsnelheid wordt verwacht lineair te dalen volgens molair percentage water aanwezig in het lucht-brandstofmengsel. De sterk vervroegde timing bij het mengsel E80W20 wijkt echter sterk van deze trend af, terwijl voor het bepalen van deze timing de standaardprocedure gevolgd is die ook kan gevonden worden in de 'Audi Startup procedure and ignition timing' bijlage in vorige thesis [3]. Een mogelijke verklaring is dat de sterk verlaagde temperaturen en lokale zones met grote waterdampconcentratie bij mengsels met verhoogde waterinhoud een drastisch effect zullen hebben op de verbrandingssnelheid.

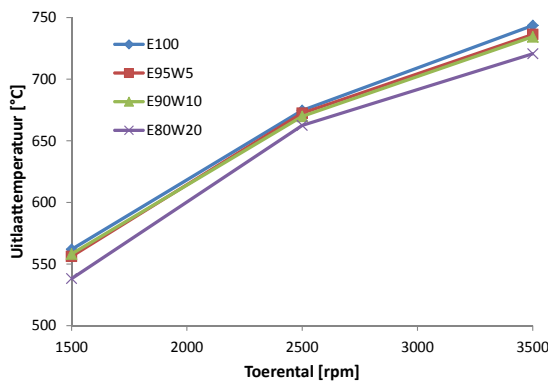
De conclusies van de werking bij één meetpunt gelden hier onveranderd voor alle toerentalen en belastingen. De invloed van de verlaagde piektemperatuur door verlaagde adiabate vlamtemperatuur bij toevoegen van water domineert de  $\text{NO}_x$ -vorming over het negatieve effect van de langere verblijftijd. Desalniettemin wordt dit laatste effect wel degelijk weerspiegeld in de resultaten met een minder grote



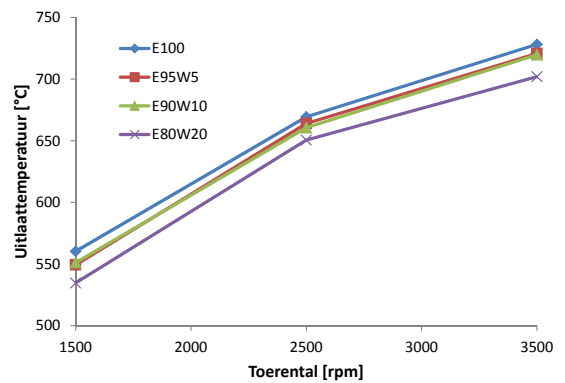
(a) MBT timing bij 40 Nm



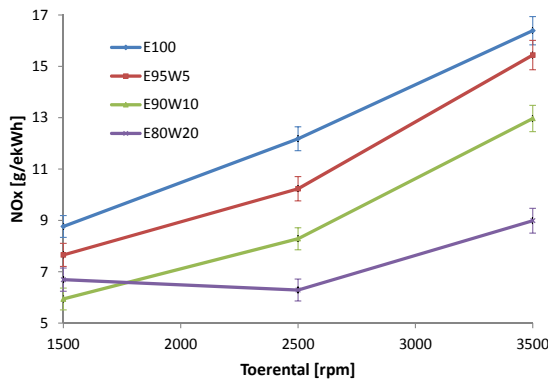
(b) MBT timing bij 80 Nm



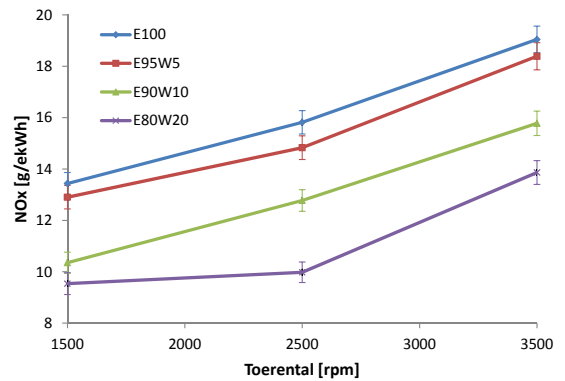
(c) Uitlaattemperatuur bij 40 Nm



(d) Uitlaattemperatuur bij 80 Nm



(e) NO<sub>x</sub>-emissies bij 40 Nm



(f) NO<sub>x</sub>-emissies bij 80 Nm

Figuur 8.5: MBT timing, uitlaattemperatuur en NO<sub>x</sub> bij verschillende belastingen

reductie van NO<sub>x</sub> voor E80W20 door de sterk vervroegde ontstekingstiming. Deze stelling wordt nog kracht bij gezet wanneer gekeken wordt naar E80W20 bij 3500 rpm. Bij lage belasting is de ontstekingsvervroeging relatief beperkt ten opzichte van de andere mengsels in vergelijking met de rest van het toerentalbereik wat resulteert in een relatief sterkere afname van NO<sub>x</sub>-formatie. Bij de hogere belasting van 80

Nm kan een analoog resultaat in omgekeerde zin beschreven worden.

Bij stijgend toerental is er een snellere ladingswisseling en dus verkorte verblijfsduur van de verbrandingsproducten aan hoge temperatuur, al is het duidelijk dat de grootste significantie bij de  $\text{NO}_x$ -vorming nog steeds aan de temperatuur kan toegeschreven worden. Bij de lagere belasting van 40 Nm wordt een sterkere uitwerking van dit effect opgemerkt. De werking met gasklep zorgt voor een beduidende onderdruk in het inlaatspruitstuk bij lage belasting waardoor de mogelijkheid bestaat dat er meer interne EGR plaatsvindt. Dit fenomeen resulteert in een steilere opgang van de vorming van  $\text{NO}_x$  in functie van het toerental.

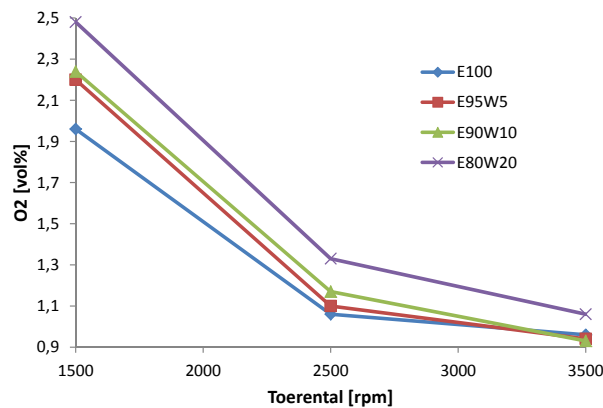
Verder vallen nog enkele zaken op in de grafieken van figuur 8.5:

- Bij 40 Nm en 1500 rpm heeft E80W20 een hogere  $\text{NO}_x$ -emissie dan E90W10
- De emissiewaarden voor E100 zijn minder hoog dan zou verwacht worden wanneer gekeken wordt naar de stijging in emissies van de waterhoudende mengsels, waarbij dit het meest opvalt bij hoge belasting en toerental.

Deze merkwaardige zaken vallen niet te verklaren aan de hand van de ontstekingsstijming of de cilindertemperaturen. Voor een verklaring van deze fenomenen wordt gekeken naar de derde parameter die een beduidende invloed heeft op aanmaak van  $\text{NO}_x$ , namelijk de aanwezigheid van een zuurstofoverschot. Theoretisch gezien heeft deze factor in deze bespreking niets te zoeken aangezien bij stoichiometrische werking ( $\lambda = 1$ ) wordt gemeten.

Voor het eerste puntje kan een praktische verklaring gegeven worden. De *drive-by-wire* gasklep van de Volvo-proefstand kende bij zeer lage openingswaarde een sterke variatie in de vorm van gaskleptrillingen. Deze trilling bij dergelijke lage opening betekende een grote variatie in luchtstroom en er werd dan ook een sterk fluctuerende uitlezing op de lambdasensor bemerkt. Gezien de grote invloed van een zuurstofovermaat op de vorming van  $\text{NO}_x$ -emissies is het niet onwaarschijnlijk dat dergelijke fluctuaties een grote relatieve fout veroorzaken die niet is meegerekend in de foutvlaggen.

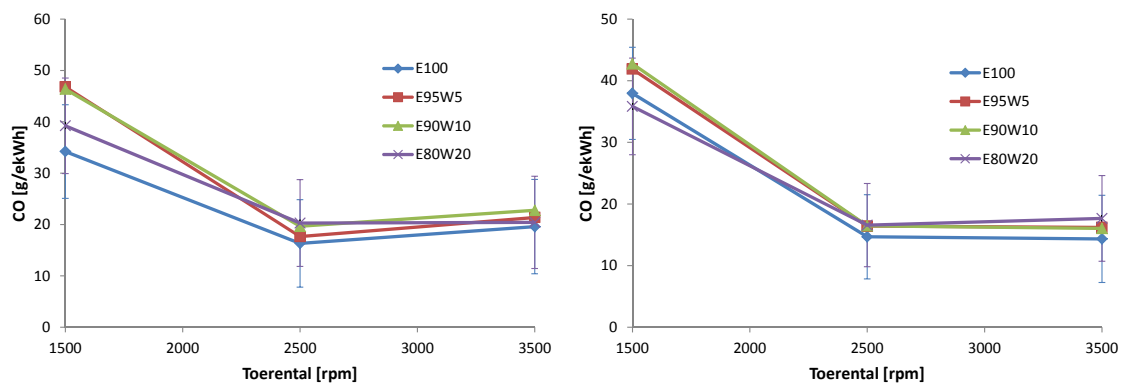
Bij het tweede merkwaardige fenomeen wordt de verklaring bij de gebruikte wideband lambdasensor gezocht. Deze is gekalibreerd voor werking op benzine en methanol. De meetwaarden voor  $\text{O}_2$  in de uitlaatgassen doen echter vermoeden dat er toch een zekere afwijking bestaat. Figuur 8.6 toont deze meetresultaten bij 80 Nm waarbij de meting op pure ethanol duidelijk bij verminderde zuurstofaanwezigheid werd uitgevoerd dan de waterhoudende mengsels.



Figuur 8.6: O<sub>2</sub>-emissies bij 80 Nm

Ook werd een alternatieve lambdawaarde berekend aan de hand van de MAF-sensor en de stoichiometrische AFR ter controle van dit merkwaardige resultaat. Al beschikt deze sensor niet over een wetenschappelijke precisie, toch kunnen er enkele trends waargenomen worden die doen vermoeden dat niet altijd voldaan is aan de stoichiometrische conditie. Dit alles maakt het plausibel dat een incorrecte werking van de lambdasensor aan de basis ligt van de relatief lage waarde voor E100.

De uitstoot van CO<sub>2</sub> kent zoals verwacht over het volledige meetbereik geen meetresultaten die buiten de foutvlaggen vallen en dus een significant verschil representeren. De variatie van deze waarden in functie van toerental en belasting is dan ook een mooie weerspiegeling van het effectieve rendement.



(a) 40 Nm

(b) 80 Nm

Figuur 8.7: CO-emissies bij verschillende belastingen

Figuur 8.7 geeft de emissiewaarden voor CO weer voor de lage en hoge belasting. Hoewel de foutvlaggen relatief groot zijn kunnen er toch enkele interessante trends

bemerkt worden. Zo valt het op dat pure ethanol over zo goed als het volledige meetbereik de laagste waarde voor CO-emissie laat optekenen. Bij 80 Nm wordt dit fenomeen echter gedeeltelijk tegengewerkt door de rijkere werking besproken in de vorige paragraaf. Dit valt te verwachten gezien de verbranding bij aanwezigheid van water in de brandstof minder volledig zal verlopen. Ook wordt nogmaals bevestigd dat (indien aan de resultaten toch enige significantie toe te kennen valt, gezien de foutvlaggen) het effect van de dissociatiereactie van CO<sub>2</sub> weinig tot geen resultaat oplevert.

## 8.4 Conclusie

Deze uitvoerige bespreking laat ons toe om enkele interessante conclusies te trekken. Het toevoegen van water tot 20 vol% in water-ethanolmengsels heeft volgend resultaat op de prestaties en emissies van een motorproefstand bedreven op stoichiometrische condities:

- Geen significante invloed op het effectieve rendement, met uitzondering van lage toerentallen waar de verminderde laminaire vlam snelheid het rendement penaliseert. Bij hogere belasting worden hogere waarden genoteerd voor de mengsels met een beperkte waterconcentratie van 5 à 10 vol%.
- Sterke verhoging van BSFC door de lagere LHV van de waterhoudende brandstoffen, praktisch betekent dit een sterke reductie van de actieradius van een personenwagen.
- Quasi lineaire verlaging van de NO<sub>x</sub>-emissie bij stijgende waterinhoud over het volledige motorbereik. Dit met dank aan het vergrote koeffect ten opzichte van alcoholen horende bij enkele eigenschappen van water zoals een hogere latente verdampingswarmte en een grotere specifieke warmtecapaciteit.
- De emissie van CO en uitstoot van CO<sub>2</sub> worden niet significant veranderd, maar voor de CO-emissie kan er toch een licht verhoogde waarde genoteerd worden die te wijten valt aan de minder volledige verbranding.

Op basis van deze zaken en de discussie in hoofdstuk 2 kunnen we besluiten dat ondanks een sterk toegenomen BSFC en dus gereduceerd rijbereik, het voordeel in productiekost de doorslag kan geven bij de keuzestrategie van zowel consument als producent. De trade-off tussen effectief rendement, BSFC en het economische aspect doen vermoeden dat een ideale waterinhoud zich tussen de 5 à 10 vol% situeert. Deze waarde bevindt zich uiterst dicht tegen de azeotrope destillatiegrens en begunstigt dus de aanbeveling om deze laatste dehydratiestap over te slaan. De grenzen

qua toegelaten waterpercentage van het "E100" waterhoudende ethanolmengsel dat aangeboden wordt op de Braziliaanse markt zitten omvat in dit resultaat.

## Hoofdstuk 9

# GEM: Componenten

In hoofdstuk 4 werd al snel duidelijk dat de lichte alcoholen enkele interessante eigenschappen vertonen ten opzichte van benzine. Voor methanol werd dit dan ook al in voorgaande thesissen [5, 3] experimenteel bevestigd. In dit hoofdstuk wordt de derde component benzine van een GEM-mengsel erbij gehaald. De drie brandstoffen worden afzonderlijk tegenover elkaar uitgezet en hun prestaties en emissies worden onderling vergeleken. Hierbij vindt men de belangrijkste eigenschappen van de drie componenten in tabel 9.1 terug. In hoofdstuk 10 zal vervolgens een meetset met ternaire mengsels worden besproken waarmee de hypothese van Turner et al. [7] al dan niet zal worden bevestigd.

Het is algemeen geweten dat de lichte alcoholen zoals methanol en ethanol het potentieel hebben om de prestaties van een motor te kunnen verbeteren ten opzichte van de werking op benzine (Euro95<sup>1</sup>). Dit hebben ze te danken aan enkele interessante eigenschappen (zie hoofdstuk 4):

- Een hoge latente verdampingswarmte in combinatie met lage stoichiometrische AFR-waarden, dit zorgt voor een belangrijk koeleffect op de ingaande lucht door de verdamping van de brandstof. Dit effect kan nog meer tot zijn recht komen bij motoren met directe injectie. De koeling zorgt ook voor een daling in de densiteit van het ingaande lucht/brandstofmengsel waardoor een groter volumetrisch rendement behaald kan worden.
- Een hoge warmtecapaciteit zorgt ook voor een extra koelend effect in de cilinder zelf. Deze is enerzijds afkomstig van de brandstof zelf vóór de verbranding en anderzijds van de hogere verhouding van triatomaire over diatomaire verbrandingsproducten ná de verbranding. Gecombineerd met een lagere adiabatische vlamtemperatuur zorgt dit voor lagere uitlaattemperaturen en bijhorende warmteverliezen.

---

<sup>1</sup>(CAS No.) 86290-81-5, (EC No) 289-220-8, (EC Index) 649-378-00-4



Eigenschap	Methanol	Ethanol	Benzine (Euro95)
Chem. formule	CH <sub>3</sub> OH	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	Variabel
Zuurstofinhoud [m%]	50	34.8	0
Massaspecifieke LHV [MJ/kg]	20.09	26.95	42.90
Volumetrische LHV [MJ/l]	15.9	21.3	31.8
AFR <sub>stoich</sub> [kg/kg]	6.43	8.95	14.4
$\rho_{\text{vloeistof}}$ bij 20°C [kg/l]	0.791	0.789	±.740
$\rho_{\text{damp}}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	4.775	1.430	2.056
$\Delta h_{\text{vap}}$ [kJ/kg]	1100	838	180-350
Zelfontstekingstemp. [°C]	465	425	228-460
$\alpha$ (#H/#C in brandstof)	4	3	±2.25
Ratio triatomaire/diatomaire producten	0.532	0.443	0.351
Laminaire vlamsnelheid bij $\lambda = 1$ en NTP [cm/s]	42	40	28
Adiabatische vlamtemp. [°C]	1870	1920	2002
Specifieke CO <sub>2</sub> uitstoot [g/MJ]	68.44	70.99	73.95

Tabel 9.1: Eigenschappen van methanol, ethanol en benzine

- Een verhoogde klopresistentie mede door het koelend effect en de verhoogde zelfontstekingstemperatuur dat enkele interessante gevolgen met zich meebrengt voor de motorprestaties. Zo kan de compressieverhouding (CR) vergroot worden wat onmiddellijk leidt tot een verhoging van het piekrendement. De MBT-timing kan in een groter deel van het motorbereik behaald worden en er kan agressieve downsizing worden toegepast, zonder de nood om een rijk brandstofmengsel te moeten gebruiken bij hoge belastingen.
- Een hoge laminaire vlamsnelheid die respectievelijk 43 en 50% hoger ligt voor methanol en ethanol ten opzichte van benzine, zorgt voor een meer isochore verbranding waardoor de ideale cyclus beter benaderd wordt. Hierdoor kan de ontstekingstiming ook enkele graden uitgesteld worden, wat resulteert in een verlaging van de piektemperatuur en dus een extra positieve invloed heeft op het effectieve rendement door de verlaging in warmteverliezen. Bovendien kan de snellere verbranding een verhoging van de maximale EGR-grenzen toelaten.

Deze eigenschappen hebben ook enkele positieve gevolgen voor de emissies:

- Een verlaging in NO<sub>x</sub>-emissies wordt verwacht ten opzichte van benzine door enerzijds de lager cilindertemperaturen door de combinatie van het koelend effect en de lagere adiabatische vlamtemperatuur en anderzijds een kortere verblijftijd van de eindgassen op de hoge temperaturen door de latere MBT.

- Een kleine vermindering in CO- en HC-emissies kan verwacht worden door het zuurstof atoom in de alcoholen en de verwachte completere verbranding die hiermee geassocieerd wordt. Voor de emissies van zuurstofhoudende koolwaterstoffen worden hogere waarden vastgesteld dan bij benzine waarbij methanol vooral formaldehyde vormt en ethanol acetaldehyde (zie paragraaf 4.3.2). Deze kunnen normaal echter weggewerkt worden door de driewegkatalysator zoals reeds vermeld in hoofdstuk 7.
- Een duidelijke verbetering in CO<sub>2</sub>-uitstoot kan ook verwacht worden door een verhoging in het effectief rendement en een lagere energie-specifieke CO<sub>2</sub>-uitstoot van de alcoholen. Indien men werkt met hernieuwbare alcoholen (bv. methanol via CO<sub>2</sub>-captatie, hoofdstuk 2) kan men een zo goed als neutrale CO<sub>2</sub>-cyclus bekomen.

Hierbij moet zeker opgemerkt worden dat een deel van deze positieve invloeden zullen teniet gedaan worden door de langere tijdsduur die nodig zal zijn om de katalysator op de gewenste temperatuur te krijgen.

## 9.1 Meetprocedure

De metingen op methanol, ethanol en benzine werden uitgevoerd op de Volvo-opstelling, waarvan de eigenschappen en de toegepaste procedure reeds in het voorgaande hoofdstuk besproken is voor de waterhoudende ethanol (zie sectie 8.2.1). Voor elk van de brandstoffen werd er gemeten bij een lage deelbelasting (40Nm) en een hogere deelbelasting (80Nm) en dit telkens bij drie motorsnelheden (1500-2500-3500 rpm). Hierbij kon de MBT-timing voor elk meetpunt zonder problemen behaald worden.

$\lambda$	Torque [Nm]	BMEP [bar]	Engine speed [rpm]
1	40	2.819	1500, 2500, 3500
1	80	5.638	1500, 2500, 3500

Tabel 9.2: Verschillende meetpunten

## 9.2 Resultaten

### 9.2.1 Vergelijking van één werkingspunt

Eerst wordt er een vergelijking gemaakt van de prestaties en emissies van de drie brandstoffen bij één werkingspunt: 40 Nm en 2500 rpm. Op deze wijze kunnen de effecten van de verschillende brandstoffen duidelijk aangetoond worden. In tabel 9.3<sup>2</sup> vinden we de resultaten terug. De berekening van de grootheden en bijhorende foutenanalyse is te vinden in de bijlage C. Alle resultaten van de metingen zijn te vinden in bijlage D.

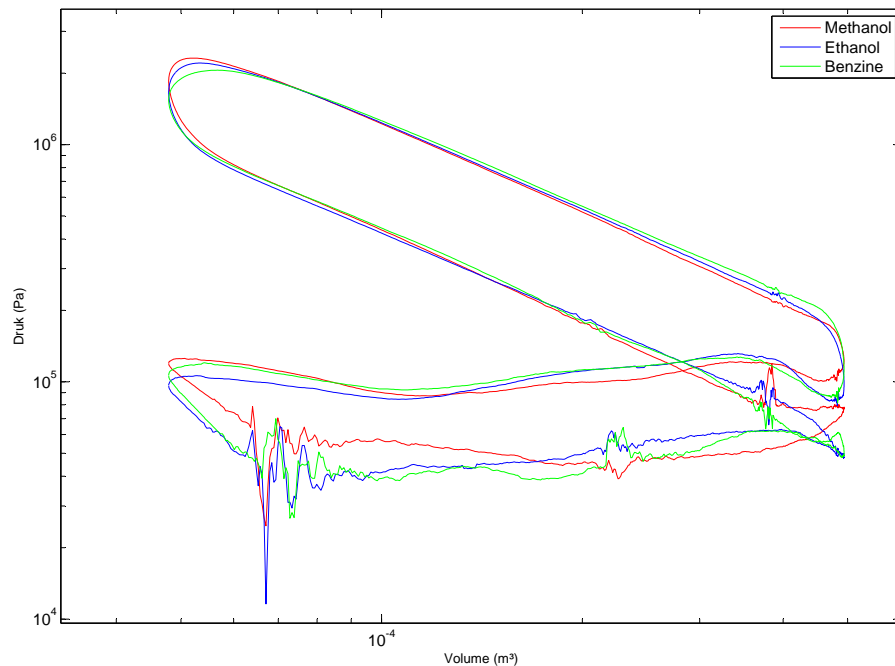
Eigenschap	Methanol	Ethanol	Benzine
$\lambda$ [-]	1	1	1
MBT [°ca BTDC]	26	26	28
Gasklepstand (TP) [%]	19.3	19.6	20.9
Luchtstroom (MAF) [g/s]	13.20	13.64	15.13
Inlaattemperatuur [°C]	25.0	28.0	33.8
Uitlaattemperatuur [°C]	664.3	674.7	696.2
$\eta_{\text{eff}}$ [%]	25.20	24.56	23.23
$\delta\eta_{\text{eff}}$ [%]	0.39	0.39	0.39
BSFC [g/ekWh]	711.10	543.87	361.19
$\delta BSFC$ [g/ekWh]	11.09	8.64	6.05
$\eta_{\text{vol}}$ [%]	34.30	34.49	35.33
$\delta\eta_{\text{vol}}$ [%]	0.88	0.89	0.96
NO <sub>x</sub> [g/ekWh]	12.36	12.18	17.60
$\delta NO_x$ [g/ekWh]	0.51	0.46	0.59
CO <sub>2</sub> [g/ekWh]	963.13	1017.05	1093.92
$\delta CO_2$ [g/ekWh]	26.42	27.48	31.20
CO [g/ekWh]	10.93	16.32	14.61
$\delta CO$ [g/ekWh]	8.12	8.53	8.96

Tabel 9.3: Vergelijking verschillende brandstoffen bij 40Nm en 2500rpm

### Prestaties

Het eerste verschil dat waargenomen wordt tussen benzine en de lichte alcoholen is de verlate ontstekingstiming van methanol en ethanol door hun hogere vlamsnelheid (resp. 50% en 43% hoger). Dit heeft als direct gevolg dat de verbranding meer isochoor zal verlopen (zie figuur 9.1) en minder zal afwijken van de ideale cyclus.

<sup>2</sup>De luchtstroom werd bepaald uit het brandstofdebiet en de  $\lambda$ -waarde aangezien de MAF-sensor een te grote variatie in waarden vertoonde bij de metingen.



Figuur 9.1: Loglog PV-diagram bij 40 Nm en 2500rpm

Deze trend in vlamsnelheden en bijhorende snellere verbranding hebben duidelijk een positieve invloed op het effectieve rendement. De uiteindelijke stijging die men waarneemt bij methanol (+1.97%pt) en ethanol (+1.33%pt) ten opzichte van benzine is echter een gevolg van meerdere effecten.

Zo zorgt de hogere energie-inhoud per volume lucht/brandstofmengsel (*'mixture calorific value'*, sectie 4.2.4) van de alcoholen ervoor dat de benodigde luchtmassa voor hetzelfde vermogen lager zal liggen. Hierdoor dalen de stromingsverliezen in de inlaatleiding en draagt dit bij aan de stijging in het rendement. Het verlaagd debiet wordt echter behaald door de gasklep minder te openen waardoor de ladingsverliezen zullen stijgen en zo een negatief effect op het rendement veroorzaken. Deze effecten worden duidelijk bevestigd in de opgemeten waarden van gasklepstand en luchtdebiet in tabel 9.3. De sterke koeling die verwezenlijkt wordt door de hoge latente verdampingswarmte van de alcoholen zorgt voor een stijging in densiteit van het lucht/brandstofmengsel wat het vorige effect nog meer versterkt. Ook het verhoogde effectieve rendement zelf zorgt ervoor dat er nog minder energie in de cilinder moet worden gebracht waardoor het benodigde lucht/brandstofdebiet nog meer zal dalen. Dit gereduceerde lucht/brandstofdebiet brengt dan uiteraard ook een daling in het volumetrisch rendement met zich mee. De waarden in tabel 9.3

bevestigen dit, hoewel de verschillen niet buiten de foutvlaggen vallen en dus niet als significant mogen beschouwd worden.

Uiteindelijk heeft ook de verhoogde verhouding van triatomaire/diatomaire moleculen bij de verbranding van methanol en (in mindere mate) ethanol een positief effect op het rendement. De warmtecapaciteit van de triatomaire moleculen is namelijk hoger dan bij diatomaire moleculen waardoor de temperaturen in de cilinder minder hoog zullen oplopen en er bijgevolg ook een reductie zal zijn in warmteverliezen.

In tabel 9.3 zien we ook zeer significante verschillen in het brandstofverbruik (BSFC) tussen de verschillende brandstoffen. Dit is uiteraard te verklaren met de lagere energie-inhoud van methanol (-50%) en ethanol (-33%) ten opzichte van benzine (31.8MJ/l). Hierbij wordt de meer relevante volumetrische energie-inhoud verkozen boven de massaspecifieke LHV aangezien deze onmiddellijk de invloed op de maximale rijafstand van de wagen (brandstoftank = constant volume) duidelijk maakt. Deze beperking is dan ook één van de belangrijkste problemen bij de lichte alcohollen als brandstofalternatief. Men kan uiteraard het volume van de brandstoftank vergroten maar dit zou dan een negatieve invloed op het brandstofverbruik met zich meebrengen door het toegenomen totaalgewicht. Ten slotte zal het verhoogde effectieve rendement de significante stijging van het brandstofverbruik bij de lichte alcohollen wat verzachten.

### **Emissies**

De vorming van  $\text{NO}_x$ -emissies is sterk gerelateerd aan de piektemperaturen in de cilinder, de verblijfsduur en de aanwezigheid van zuurstof. Aangezien er werd gemeten bij stoichiometrische omstandigheden ( $\lambda = 1$ ) heeft deze laatste factor normaal weinig tot geen invloed. In tabel 9.3 zien we dat de lichte alcohollen een significante daling vertonen in  $\text{NO}_x$ -emissies. Dit kan verklaard worden door verschillende effecten waaronder de hogere vlamsnelheid die ervoor zorgt dat de MBT-timing enkele graden kan worden uitgesteld zodat de restgassen minder lang verblijven op de hoogste temperaturen. De lagere vlamtemperatuur van de alcohollen gecombineerd met het koelingseffect door de hoge latente verdampingswarmte en hoge specifieke warmtecapaciteit zorgt dan weer voor een verlaging van de piektemperaturen. Ook dit heeft uiteraard een positieve invloed op de  $\text{NO}_x$ -emissies.

Het valt echter op dat de waarde bij ethanol net iets lager ligt dan bij methanol terwijl de tijdsinvloed van de MBT timing gelijk is en de temperaturen bij methanol ook lager liggen. Hierdoor verwachten we dus eigenlijk een lagere  $\text{NO}_x$ -vorming bij methanol. Deze afwijking kan verklaard worden door de invloed van zuurstofaanwezigheid. De stoichiometrische werkingsstrategie werd ingesteld via een wideband  $\lambda$ -sensor die gekalibreerd werd voor methanol en benzine. Bij ethanol stellen we

echter vast dat de O<sub>2</sub>-uitstoot hoger ligt bij methanol ten opzichte van ethanol, wat er op kan wijzen dat de verbranding voor deze laatste in rijkere omstandigheden is gebeurd. Dit kan leiden tot beduidend lagere NO<sub>x</sub>-waarden en zou de onverwacht lagere waarde kunnen verklaren.

Ook de CO-emissies die een gevolg zijn van onvolledige verbranding vertonen het effect van de iets rijkere verbranding van ethanol. Men kan echter geen wetenschappelijke conclusies stellen bij deze emissies aangezien de grootte van de foutvlag bijna even groot is als de meetwaarde zelf.

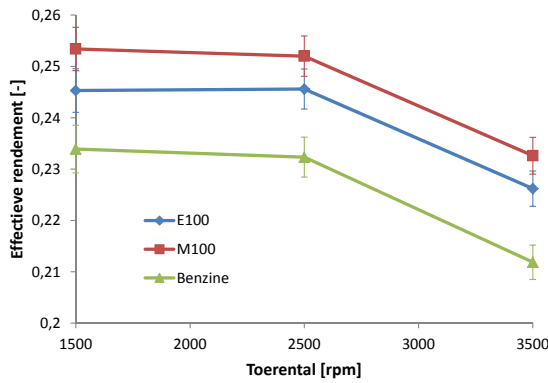
Voor de CO<sub>2</sub>-uitstoot stelt men significante verschillen vast tussen de drie brandstoffen waarbij methanol (-12%) en ethanol (-7%) duidelijk lagere waarden vertonen dan benzine (1093.92 g/ekWh). Dit kan verklaard worden door de hogere molaire massa per koolstofatoom bij de lichte alcoholen waardoor de specifieke CO<sub>2</sub>-uitstoot (tabel 9.3) lager ligt. Ook het hogere effectieve rendement helpt mee om de uitstoot te reduceren. Het grotere brandstofverbruik van de alcoholen heeft dan weer een tegenwerkende invloed hierop. Uiteindelijk weegt de stijging door het verbruik minder door dan de daling afkomstig van het rendement en specifieke CO<sub>2</sub>-uitstoot wat tot een reductie leidt in CO<sub>2</sub>-uitstoot.

### 9.2.2 Evolutie met toerental en belasting

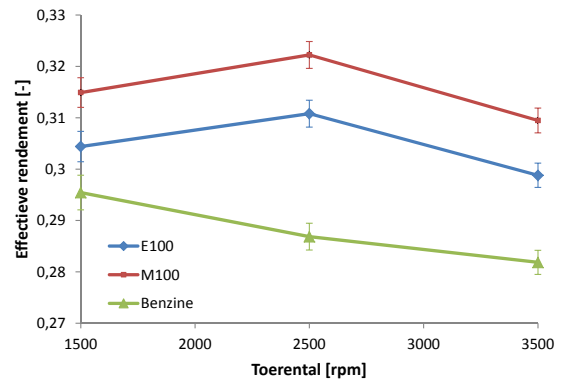
In de volgende paragraaf worden voor de net besproken grootheden de evoluties met toerental en belasting besproken. De metingen werden op dezelfde Volvomotor uitgevoerd als de ethanol/water meetset uit hoofdstuk 8 en men kan dus gelijkaardige resultaten verwachten zoals in sectie 8.3.2 besproken.

#### Prestaties

In figuur 9.2 ziet men het effectieve rendement van de verschillende brandstoffen bij verschillende belasting en motorsnelheden. Voor bijna elk meetpunt is het rendement van methanol significant beter dan ethanol, wat op zijn beurt telkens significant beter is dan benzine. In vorige paragraaf is reeds besproken dat dit te verklaren is door de lagere warmteverliezen (koeffect) en de hogere vlamsnelheid die een meer isochore verbranding met zich meebrengt. Met stijgende belasting stelt men ook een stijging vast in rendement die te verklaren is door de kleinere verhouding van wrijvingsvermogen en vermogen afgenomen door de hulptoestellen ten opzichte van het effectieve vermogen. Ook de verminderde ladingsverliezen door de gasklep die meer open staat om een groter lucht/brandstofdebiet in de cilinder te krijgen voor het hogere vermogen zorgen voor een positieve invloed op het rendement.



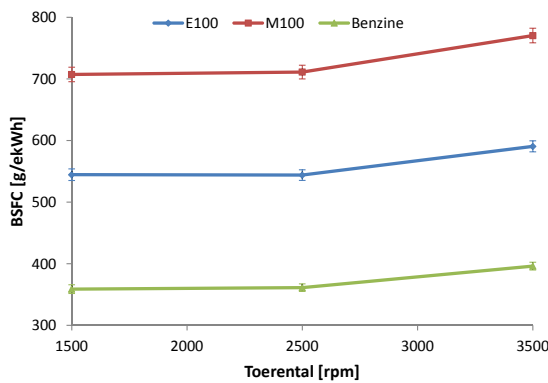
(a) 40 Nm



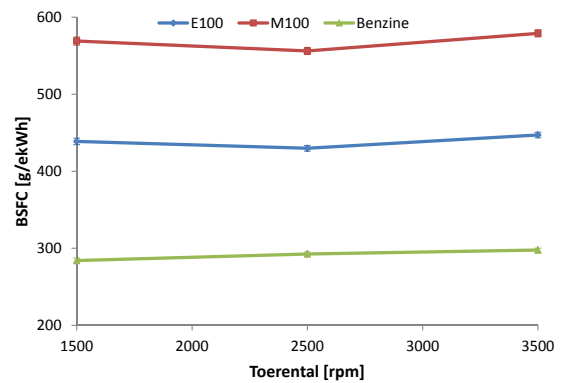
(b) 80 Nm

Figuur 9.2: Effectieve rendement bij verschillende belastingen

Met een stijgend toerental ziet men een lichte daling in het effectieve rendement, hierbij spelen verscheidene effecten een rol. Zo is het benodigde lucht/brandstofdebiet hoger wat leidt tot grotere stromingsverliezen, dit wordt echter onmiddellijk tegengegaan door de gereduceerde ladingsverliezen over de gasklep die wat meer geopend is om het grotere debiet te kunnen leveren. De vermindering van het mechanisch rendement met stijgend toerental door de sterke stijging in wrijvingsverliezen is echter de belangrijkste factor die het effectieve rendement doet dalen.



(a) 40 Nm

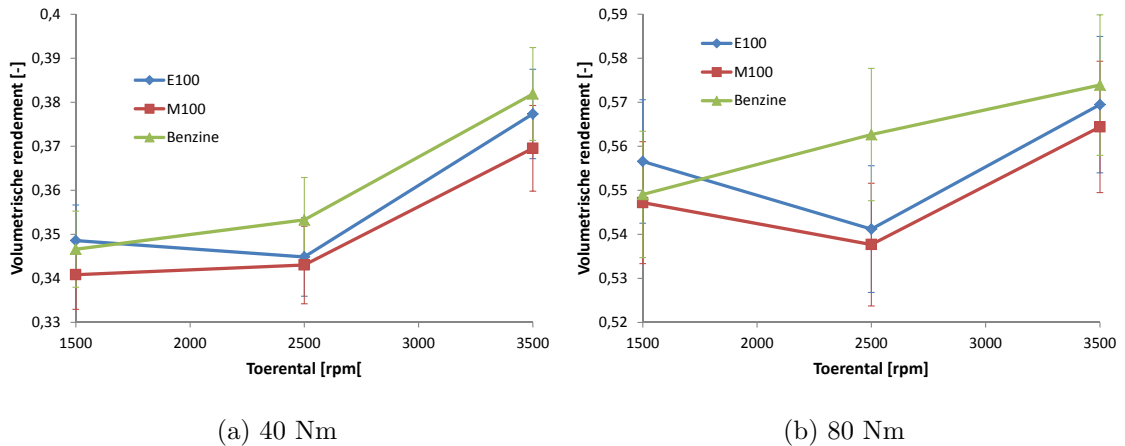


(b) 80 Nm

Figuur 9.3: Specifiek brandstofverbruik bij verschillende belastingen

Zoals bij de bespreking van één werkingspunt is het specifieke brandstofverbruik (BSFC) op methanol significant hoger dan bij ethanol, wat dan weer significant hoger ligt dan bij benzine (zie figuur 9.3). Dit uiteraard door het verschil in energie-inhoud tussen de drie brandstoffen. De invloeden van toerental en belasting zijn rechtstreeks gekoppeld met het verloop van het effectieve rendement. De stijging met het toerental is het gevolg van de daling in het rendement en heeft dus ook

dezelfde oorzaken. Ook de daling van het BSFC met stijgend koppel heeft dezelfde oorzaken als de stijging van het rendement.



Figuur 9.4: Volumetrisch rendement bij verschillende belastingen

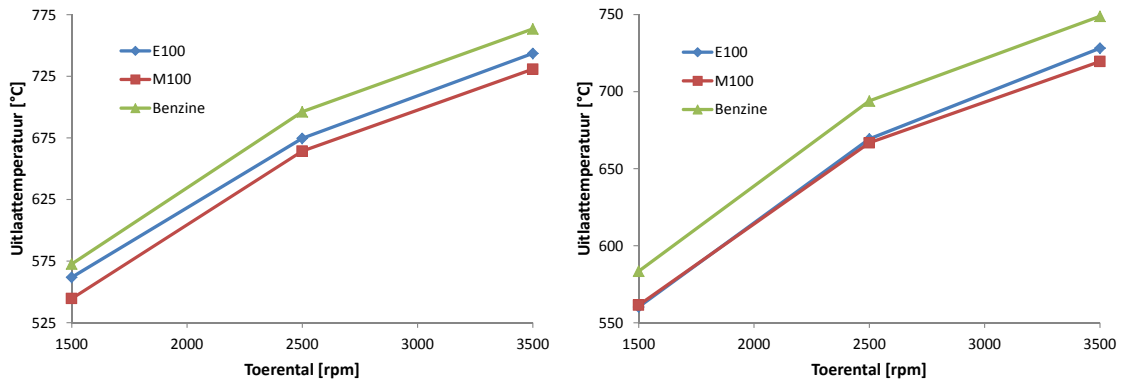
In figuur 9.4 ziet men het volumetrisch rendement waarbij er geen significante verschillen zijn tussen de verschillende brandstoffen. Niettegenstaande de verschillen binnen de foutvlaggen liggen, kunnen we toch een bepaalde trend waarnemen. Zoals hoger besproken, is de vullingsgraad bij methanol lager dan bij ethanol en benzine. Dit kan men dan ook terug verklaren door de hogere *'mixture calorific value'* van de lichte alcoholen. De invloed van koppel en toerental lopen terug volledig gelijk met het effectieve rendement, als het effectieve rendement stijgt is er namelijk een kleinere hoeveelheid lucht/brandstofmengsel nodig om hetzelfde vermogen te leveren en bijgevolg is de cilinder ook minder gevuld. Hierbij is het licht afwijkende punt bij 80 Nm en 2500 rpm te verklaren door het effectieve rendement in dit werkingspunt dat wat lager ligt dan volgens de verwachte trend (zie figuur 9.2).

## Emissies

Zoals bij de bespreking van één werkingspunt liggen de  $\text{NO}_x$ -emissies van benzine in alle meetpunten significant hoger dan bij de lichte alcoholen (zie figuur 9.5). Deze daling wordt bekomen door het sterke koelingseffect en de uitgestelde MBT timing die beide een reductie in emissies veroorzaken. De afwijking van de zeer lage  $\text{NO}_x$ -emissies bij ethanol kunnen verklaard worden met dezelfde reden als bij één werkingspunt, namelijk door het feit dat ethanol bij alle werkingspunten in wat rijkere omstandigheden heeft gewerkt. Met stijgend toerental lijkt het negatieve effect van de stijgende temperatuur (figuur 9.5) de kortere verblijftijd te domineren waardoor de  $\text{NO}_x$ -emissies dus toenemen. Bij de 40 Nm belasting lijkt de invloed van de temperatuur nog groter te zijn. Men zou dit kunnen verklaren doordat de gaskleppositie bijna gesloten is bij deze lage belasting en dus een aanzienbare

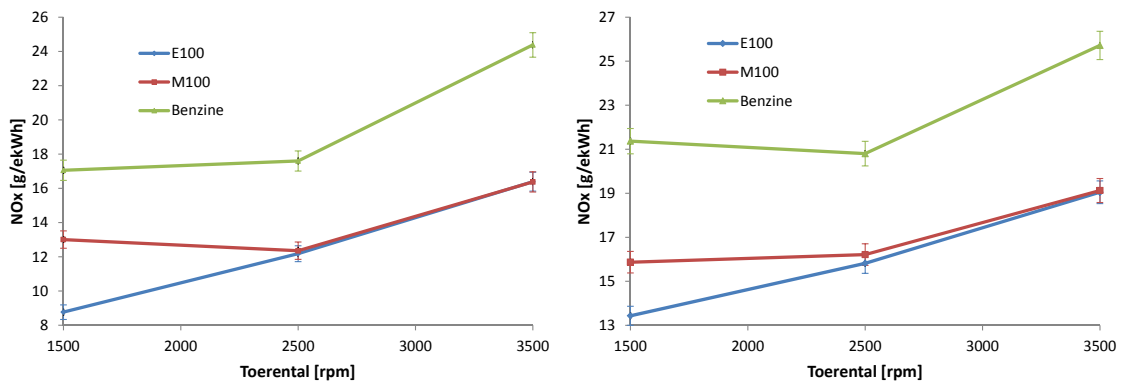


onderdruk induceert. Dit kan een verhoogde interne EGR met zich meebrengen waardoor de stijging in  $\text{NO}_x$ -emissies met toenemend toerental steiler is dan bij hogere belastingen. Met stijgende belasting zal dus de interne EGR verminderen wat resulteert in een stijging in  $\text{NO}_x$ -emissies.



(a) Uitlaattemperatuur bij 40 Nm

(b) Uitlaattemperatuur bij 80 Nm



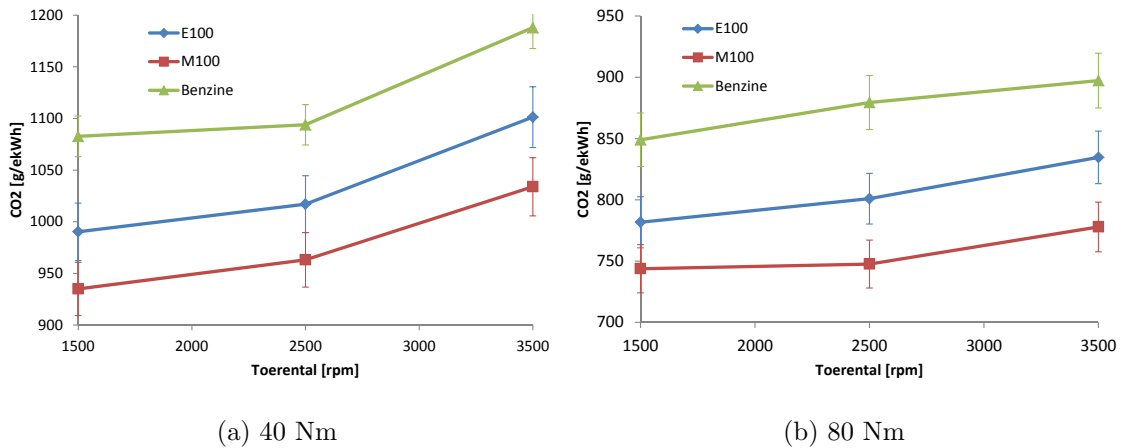
(c)  $\text{NO}_x$ -emissies bij 40 Nm

(d)  $\text{NO}_x$ -emissies bij 80 Nm

Figuur 9.5: Uitlaattemperatuur en  $\text{NO}_x$  bij verschillende belastingen

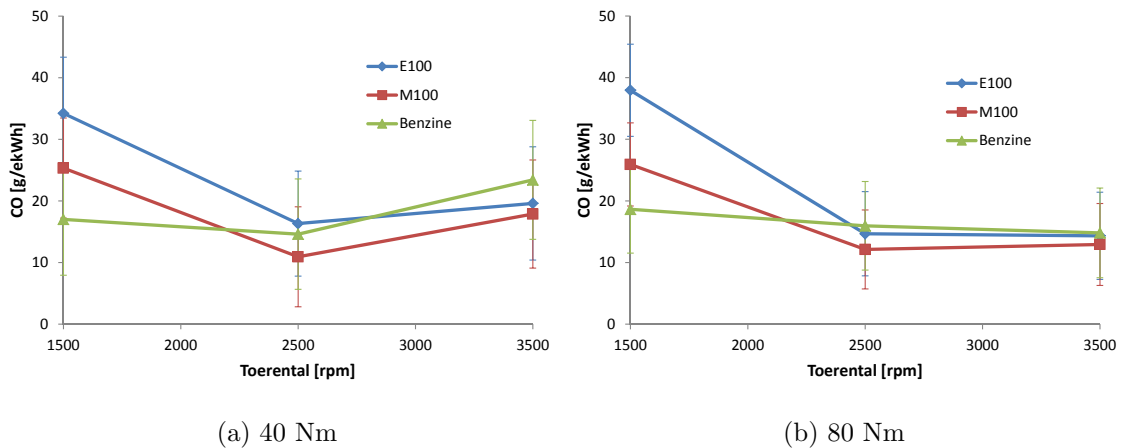
In figuur 9.6 zien we de  $\text{CO}_2$ -uitstoot van de verschillende brandstoffen. Bij alle meetpunten wordt er een duidelijke vermindering vastgesteld bij de alcoholen ten opzichte van benzine waarbij methanol nog wat lagere waarden vertoont dan ethanol. Zoals eerder vermeld is dit vooral te wijten aan de lagere specifieke  $\text{CO}_2$ -uitstoot en het verhoogde effectieve rendement. De invloed van de belasting en het toerental is net het tegenovergestelde van de invloed op het effectieve rendement. Als het rendement stijgt, daalt de  $\text{CO}_2$ -uitstoot namelijk. Er zal dus een stijging zijn met toenemend toerental en een daling met toenemend koppel. De oorzaken hiervan staan dus ook besproken in de betreffende sectie van het effectieve rendement.

De enorme foutvlaggen bij de CO-emissies zorgen ervoor dat alle onderlinge verschillen niet buiten de experimentele onzekerheid vallen en er dus geen wetenschappelijke



Figuur 9.6: CO<sub>2</sub>-emissies bij verschillende belastingen

conclusies kunnen getrokken worden hieromtrent. De opmerking bij de NO<sub>x</sub>-emissies over de iets rijkere werkomstandigheden bij ethanol worden echter toch terug gevonden in de CO-emissies van ethanol die bij alle meetpunten opvallend hoger liggen dan methanol (figuur 9.7).



Figuur 9.7: CO-emissies bij verschillende belastingen

### 9.3 Conclusie

Op basis van voorgaande paragrafen kan men nu enkele interessante conclusies trekken over de prestaties en emissies van lichte alcoholen ten opzichte van benzine bij stoichiometrische omstandigheden:

- Een significante stijging in het effectieve rendement voor zowel methanol en (in mindere mate) ethanol. Dit voornamelijk door hun hoge vlamsnelheid die

- leidt tot een meer isochore verbranding en hun grote koeffect.
- Een sterke verhoging in het brandstofverbruik (BSFC) door hun lagere LHV wat leidt tot een verminderde maximale rijafstand. Dit effect wordt echter wat verzacht door de hogere rendementen.
  - Een duidelijke reductie in  $\text{NO}_x$ -emissies dankzij het grote koeffect en de hoge vlamsnelheid van alcoholen. De kleine verschillen tussen methanol en ethanol zijn mogelijk te verklaren door een afwijkende uitlezing van de wideband  $\lambda$ -sensor.
  - Een duidelijke vermindering in  $\text{CO}_2$ -uitstoot door de hogere molaire massa per koolstofatoom en een verhoogd rendement. Deze daling wordt echter deels tegengewerkt door het verhoogde brandstofverbruik.

Het is duidelijk dat methanol en ethanol enkele zeer interessante eigenschappen vertonen ten opzichte van benzine en een waardig duurzaam alternatief zouden kunnen zijn voor de huidige fossiele brandstoffen. Zoals eerder vermeld, verwacht men niet echt een rechtstreekse overstap naar de alcoholen maar eerder een evolutie d.m.v. alcohol/benzinemengsels. Een goed gekend voorbeeld hiervan is het binaire E85-mengsel maar ook methanol/benzinemengsels werden reeds uitgebreid bestudeerd [3]. Turner et al. gingen hierin nog verder en bedachten het concept van ternaire GEM-mengsels die isostoichiometrisch zijn met E85. In het volgende hoofdstuk wordt dit concept verder onder de loep genomen met experimenten op een proefstand. Door de vergelijking met dit hoofdstuk te maken zullen de eventuele resulterende effecten kunnen toegeschreven worden aan de verscheidende samenstellende componenten van deze mengsels.

## Hoofdstuk 10

# GEM: Ternaire mengsels

In sectie 4.4 van hoofdstuk 4 werden het concept en de eigenschappen van de ternaire mengsels reeds uitvoerig beschreven. Wanneer deze mengsels isostoichiometrisch samengesteld worden bezitten ze het potentieel om met eenzelfde hoeveelheid ethanol een groter volume hernieuwbare brandstof aan te maken. Dit gegeven is uiterst interessant om bij het omschakelen van puur fossiele naar meer duurzame brandstoffen de biomassalimiet zo veel mogelijk te ontwijken. In dit hoofdstuk worden de experimentele resultaten besproken die bekomen werden na beproeven van enkele van dergelijke mengsels op de Volvo-proefstand. Aan de hand van deze resultaten zal gekeken worden naar de geldigheid van de hypothese van Turner et al. [7] Deze hypothese stelt dat de isostoichiometrische GEM-blends met slechts beperkte (tot geen) invloed op prestaties en emissies als drop-in brandstof kunnen gebruikt worden in de hedendaags beschikbare flex-fuelvoertuigen. Een dergelijk GEM-mengsel wordt hedendaags gebruikt als racebrandstof in de Junior WRC klasse<sup>1</sup> met als doel om een meer duurzame motorsport te combineren met verbeterde prestaties.

### 10.1 Verwachtingen

Op basis van de resultaten bekomen in het vorige hoofdstuk en de gerapporteerde resultaten in het werk van Turner kunnen nu enkele verwachtingen geformuleerd worden. Ook de gegevens weergegeven in tabel 10.1 gecombineerd met hun uitgebreide bespreking in hoofdstuk 4 zijn nuttige indicatoren voor de verwachte resultaten. Het is duidelijk dat deze alcoholhoudende mengsels een analoge (voornamelijk positieve) invloed zullen hebben op de prestaties en emissies ten opzichte van pure benzine als de brandstoffen besproken in hoofdstukken 8 en 9. De optredende fysische oorzaken zullen in dit hoofdstuk dan ook niet in detail herhaald worden en de focus ligt op de onderlinge verschillen tussen de mengsels.

---

<sup>1</sup><http://www.wrc.com/jwrc/news/junior-wrc-switches-to-biofuel/?fid=18570>

	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>
<b>Eigenschap</b>	<b>E85</b>	<b>G29.5E42.5M28</b>	<b>G37E21M42</b>	<b>M57</b>
Zuurstofinhoud [m%]	23.34	22.74	22.38	22.54
Massaspecifieke LHV [MJ/kg]	29.22	29.48	29.66	29.53
Volumetrische LHV [MJ/l]	22.82	22.79	22.81	22.59
AFR <sub>stoich</sub>	9.72	9.76	9.80	9.73
$\rho_{\text{damp}}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	2.24	2.13	2.08	2.01
$\Delta h_{\text{vap}}$ [kJ/kg]	756.6	751.5	747.5	754.5
$\alpha$ (#H/#C in brandstof)	2.83	2.86	2.87	2.90
Laminaire vlamnelheid bij $\lambda = 1$ en NTP [cm/s]	38.78	38.17	37.83	37.65
Specifieke CO <sub>2</sub> -uitstoot [g/MJ]	71.69	71.56	71.49	71.41
Dampdruk (kPa)	40	61	72	72

Tabel 10.1: Eigenschappen van verschillende ternaire GEM-mengsels

Het is belangrijk te vermelden hoe de samenstelling van deze mengsels tot stand is gekomen. Enerzijds was er de keuze van de concentraties van de samenstellende componenten van de GEM-blends. Hier werd gekozen om zo goed mogelijk de vergelijking met de resultaten van Lotus Engineering te kunnen maken, op dit moment de enige rechtstreeks bruikbare referentie voor dergelijke mengsels. Hierbij zijn de 2 uitersten van het ternaire E85-diagram gekozen met 85 vol% (A) en 0 vol% ethanol (D). De keuze voor de 2 overige mengsels zijn ontstaan door de hoeveelheid ethanol telkens te halveren tot 42.5 vol% (B) en 21 vol% (C).

Het D-mengsel betreft in deze echter geen M56 [7] maar bevat 1 vol% methanol meer om de AFR zo goed mogelijk te doen overeenstemmen met deze van de andere mengsels. De reden tot variatie ten opzichte van de referentie is te zoeken bij de AFR van de gebruikte benzine. Eerdere testmetingen op de aan de pomp getankte Euro95<sup>2</sup> wezen uit dat deze benzine een lagere AFR had dan de standaardwaarde 14,6. Dit kan te wijten zijn aan de beperkte alcoholinhoud die hedendaags reeds standaard wordt voorgemengd in benzine (tot 5 vol% ethanol en 1 vol% methanol, zie hiervoor ook de specificatie van Euro95 in de bijlage). Het is belangrijk op te merken dat de mogelijkheid bestaat dat deze extra alcoholconcentratie ook een invloed zal hebben op de meetresultaten. Idealiter zou hiervoor een onderzoeksbrandstof zonder additieven gebruikt worden, maar deze was niet ter beschikking. De lagere AFR van de benzine wordt bevestigd na een serie testen op de CFR-proefstand waarop een nauwkeurige air flow sensor geïnstalleerd is. Er wordt een AFR waarde van 14,4 aangenomen waarmee het M57 geschikter is om de isostoichiometrische werking zo goed mogelijk te benaderen. Voor de andere mengsels dient gezien de kleinere

<sup>2</sup>(CAS No.) 86290-81-5, (EC No) 289-220-8, (EC Index) 649-378-00-4

benzine-inhoud geen aanpassing te worden voorzien.

Mengsels A en D werden aangemaakt door splash blending van respectievelijk pure ethanol en pure (bio-)methanol met de benzine van de pomp. Het C-mengsel werd in zijn finale samenstelling voorgemengd aangekocht in voldoende grote hoeveelheid. Dit was noodzakelijk om met de beschikbare pure ethanol voldoende mengsel aan te maken om de hierna besproken meetset uit te kunnen voeren. De specificaties van deze brandstof zijn terug te vinden op de bijgeleverde DVD. Door toevoegen van pure methanol en benzine aan dit C-mengsel wordt uiteindelijk het B-mengsel bekomen met een samenstelling G29,5E42,5M28. Ook hier dient de kanttekening gemaakt te worden dat de specificaties van de benzine die in het C-mengsel vervat zit niet gekend is. Om eventuele invloeden te kunnen verklaren wordt een kleine vergelijkende meetset uitgevoerd met een C-mengsel dat volledig uit de aparte componenten wordt samengesteld en waarbij dus de benzine van de pomp in wordt gebruikt.

### **Prestaties**

De eigenschappen vermeld in tabel 10.1 doen vermoeden dat de voorgestelde iso-stoichiometrische mengsels slechts weinig verschil in de prestatieparameters zullen vertonen. Dit vermoeden wordt gesterkt door de resultaten gepubliceerd in het werk van Turner et al.[7] die bij uitvoeren van een NEDC cyclus met een flex-fuelvoertuig met de 4 mengsels tot eenzelfde besluit kwamen (zie sectie 4.4.5). Hierbij kan echter de kanttekening worden gemaakt dat de exacte werking en bijhorende mogelijke invloeden van de ECU op het resultaat niet bekend waren bij de auteurs.

Wanneer gekeken wordt naar de mengselsamenstelling kan reeds benaderend voorspeld worden waar de ontstekingstiming bij MBT zich zou moeten bevinden. Als er verondersteld wordt dat de vlamsnelheid kan benaderd worden met de '*energy fraction mixing rule*', dan wordt een MBT-timing verwacht die later ligt dan de waarde voor benzine en vervroegd is ten opzichte van zowel ethanol als methanol. Met de resultaten van het vorige hoofdstuk 9 kan dan reeds een gerichte schatting gemaakt worden. Er zijn op dit moment echter nog geen experimentele gegevens beschikbaar over de vlamsnelheden van ternaire GEM-mengsels, verder onderzoek hieromtrent is noodzakelijk om deze veronderstelling te staven.

Ook het klopedrag zou gelijk moeten zijn voor de 4 mengsels. Een van de hoofdpijlers van de te controleren hypothese is het onveranderd blijven van het octaangetal in functie van de brandstofsamenstelling. Dit was de opvallende conclusie van een uitgebreid onderzoek bij Lotus Engineering naar het octaangetal (RON & MON) van de GEM-mengsels (zie ook sectie 4.4.4). Praktisch houdt dit in dat het gebied waar zich een risico op klop voordoet, de grens van het klopfenomeen bij eenzelfde ontstekingstiming valt en dus eenzelfde beperking stelt op het behalen van MBT-

timing. Bij de experimenten beschreven in dit hoofdstuk zal dit laatste echter niet ter zake doen aangezien de beperkte compressieverhouding van de Volvo-proefstand over het volledige motorbereik geen klop induceert. In het volgende hoofdstuk 11 wordt met een experiment op de Audi-proefstand verder ingegaan op het klopgedrag van de ternaire mengsels en wordt de vergelijking gemaakt met benzine en de samenstellende componenten.

Voor het effectieve rendement worden ook gelijkaardige waarden verwacht voor alle mengsels. Wanneer gekeken wordt naar de gegevens in tabel 10.1 lijkt het weinig plausibel dat de beperkte verschillen een meetresultaat zullen opleveren dat buiten de foutvlaggen valt. De enige twee effecten die eventueel een verschil kunnen maken zijn:

- Een lichte variatie in vlamsnelheid wat zijn invloed heeft op het isochoor zijn van de verbranding. Hoe hoger de vlamsnelheid, hoe meer isochoor en rendementsgewijs dus gunstig.
- Lichte verschillen in latente verdampingswarmte en specifieke warmtecapaciteit kunnen het koeleffect beïnvloeden. Dit kan op zijn beurt dan weer resulteren in een variabel warmteverlies en hieraan gekoppeld het effectieve rendement.

Met het ontbreken van bevestigende informatie betreffende de vlamsnelheden is het niet eenvoudig om voorspellingen te doen inzake verbrandingsefficiëntie. Op basis van de drukfiguren zal hier eventueel een schatting van kunnen gemaakt worden. Indien dezelfde veronderstelling als voorheen gemaakt wordt dat de laminaire vlamsnelheid van de mengsels kan benaderd worden met de energie fractie mengregel, is het aannemelijk dat de waarde van het effectieve rendement zich ook ergens tussenin de waardes van benzine en de alcoholen zal scharen. Ook het koeleffect zal een beperktere uitwerking hebben in vergelijking met de pure alcoholen, wat de vorige stelling nog meer kracht bijzet. Met respectievelijke laminaire vlamsnelheden van 28, 40 en 42 cm/s<sup>3</sup> voor benzine, ethanol en methanol wordt er een, zij het beperkte, dalende invloed voorspeld in functie van de benzineconcentratie in het mengsel. Ook de dalende trend in de latente verdampingswarmte met toenemende benzine-inhoud kan dit effect versterken, al is het weinig waarschijnlijk dat zelfs de combinatie van deze twee effecten de foutvlaggen zullen overstemmen.

Het sterk aan deze discussie verwante brandstofverbruik wordt ook niet verwacht significant te verschillen tussen de mengsels onderling. Dit was ook niet het geval voor de experimenten op het Saab BioPower flex-fuelvoertuig die volgens de NEDC-cyclus werden uitgevoerd bij Lotus Engineering.

---

<sup>3</sup>bij  $\lambda = 1$  en NTP

Ook hier dient zoals in de vorige hoofdstukken van het experimenteel gedeelte de kanttekening gemaakt te worden dat gezien de lagere LHV-waarde ten opzichte van pure benzine er een sterk verhoogde BSFC zal zijn voor de alcoholhoudende mengsels. Dit betekent in de praktijk dat het rijbereik van een flex-fuelvoertuig afhankelijk is van de samenstelling van de tankinhoud. Dit gegeven maakt bij niet-isostoichiometrische werking een bepaalde vorm van alcoholconcentratie meting noodzakelijk, zodat het rijbereik ten allen tijde correct wordt weergegeven aan de bestuurder (zie ook hoofdstuk 5). Wanneer echter enkel met isostoichiometrische mengsels gewerkt wordt is dit niet nodig.

### **Emissies**

Voor de verwachtingen van de emissies wordt voornamelijk gekeken naar de eigenschappen en samenstelling van de mengsels. De enige referentie voor de hier geëxperimenteerde mengsels werd bekomen door emissiemetingen na de katalysator van een wagen. Deze werkwijze maakt het wel nog mogelijk om enkele algemene assumpties te maken maar kan de invloed van de concentratie methanol/ethanol maskeren. Voor een samenvatting van deze emissieresultaten bekomen na testen op een passagierswagen, zie sectie 4.4.5.

Ook voor de CO<sub>2</sub>-uitstoot worden er weinig verschillen verwacht tussen de verschillende mengsels. De licht stijgende trend van molaire massa per koolstofatoom met stijgend benzine (en methanol) gehalte doet een lichte stijging in specifieke uitstoot vermoeden. De verwachte licht dalende trend van het effectief rendement met stijgend benzinegehalte werkt echter het effect van deze specifieke CO<sub>2</sub>-uitstoot al onmiddellijk tegen, waardoor de uiteindelijke fout niet verwacht wordt buiten de grenzen van de experimentele onzekerheid te vallen. Beide vernoemde effecten kunnen echter wel resulteren in een significante daling in CO<sub>2</sub>-uitstoot ten opzichte van de pure benzine.

Zoals reeds uitvoerig besproken bestaan de drie bepalende factoren voor de NO<sub>x</sub>-emissie uit de piektemperatuur in de cilinder, de verblijfsduur van de eindgassen op hoge temperatuur en de aanwezigheid van zuurstof. In de vorige hoofdstukken werd steeds besloten dat de temperatuur invloed hierbij het zwaarst doorweegt in de vergelijking tussen de eerste twee effecten. Ook hier wordt met stoichiometrische condities gewerkt en wordt dus geen invloed van de zuurstofovermaat verwacht. Er worden geen grote verschillen in warmtecapaciteit verwacht tussen de mengsels en tabel 10.1 toont de berekende latente verdampingswarmtes die ook slechts licht variëren. Hierbij dient wel de kanttekening geplaatst te worden dat deze berekening gebeurde met een gemiddelde waarde voor de latente warmte van benzine (265 kJ/kg). Deze waarde voor benzine kan echter een sterke spreiding vertonen en gezien de ongekende eigenschappen van de twee soorten gebruikte benzine is het



mogelijk dat een verlaagde latente warmte van de benzine van de pomp resulteert in een lichte temperatuurstijging voor de mengsels met hoger benzinegehalte.

Ook de resultaten van Turner et al. [7] doen een beperkte invloed op  $\text{NO}_x$  van het benzinegehalte vermoeden. Voor M56 worden namelijk daar de hoogste  $\text{NO}_x$ -emissies genoteerd. Voor de emissies van HC wordt echter een omgekeerde trend waargenomen, met over het algemeen een gelijkwaardige totale HC-emissie als voor benzine. Zoals ook al eerder vermeld is er op de Volvo-proefstand geen mogelijkheid tot vergelijkende HC-meting aangezien de FID-sensor onvoldoende snel is voor emissies van zuurstofhoudende koolwaterstoffen.

Met de opmerkingen van vorige hoofdstukken in verband met de lambdasensor en zuurstofovermaat in het achterhoofd zal ook hier extra aandacht geschonken moeten worden aan het nauwkeurig evalueren van het stoichiometrisch zijn van de experimenten.

Dit laatste aspect zal ook van belang zijn bij het verklaren van eventuele verschillen in CO-emissies. Rijke werking ( $\lambda < 1$ ) kan zorgen voor een onvolledige verbranding en dus in een stijging van deze emissies resulteren. Verder worden geen al te grote afwijkingen in CO-emissie verwacht voor de verschillende mengselsamenstellingen.

## 10.2 Resultaten

De hier besproken meetresultaten werden ook allen bekomen op de Volvo-proefstand die besproken werd in sectie 8.2.1. De volledige uitkomst van deze metingen is opnieuw terug te vinden in bijlage D, in bijlage C kan de bespreking van de uitgevoerde berekeningen en de daaraan gekoppelde foutenanalyse geraadpleegd worden.

### 10.2.1 Meetprocedure

De werkingswijze gebruikt bij het samenstellen van de mengsels werd reeds besproken in de sectie 10.1. De keuze voor de meetpunten wordt opnieuw gemaakt om een zo goed mogelijk beeld te kunnen verkrijgen van de invloed van toerental en belasting op de prestaties en emissies van de ternaire mengsels. Met de aankoop van het voorgemengde mengsel kan hier een grotere meetset uitgevoerd worden met 5 toerentallen en 3 koppels (zie tabel 10.2). Er wordt gekozen voor een lage belasting van 20 Nm, een gemiddelde belasting van 40 Nm en een middelhoge belasting van 80 Nm. De toerentallen representeren de voornaamste toerentallen gebruikt in de rijcyclus van een personenwagen waarbij de motor in steady-state werking bedreven wordt.

**Mengsels A - B - C - D**

$\lambda$	Koppel [Nm]	BMEP [bar]	Toerental [rpm]
1	20	1.410	1500, 2000, 2500, 3000, 3500
1	40	2.819	1500, 2000, 2500, 3000, 3500
1	80	5.638	1500, 2000, 2500, 3000, 3500

Tabel 10.2: Overzicht meetpunten

**Referentie mengsel C**

$\lambda$	Koppel [Nm]	BMEP [bar]	Toerental [rpm]
1	40	2.819	1500, 2500, 3500

Tabel 10.3: Overzicht meetpunten

Tabel 10.3 geeft de meetpunten van de referentie meetset die een zelf aangemaakt mengsel met samenstelling G37E21M42 met enkel benzine van de pomp vergelijkt met het aangekochte C-mengsel. Hierbij worden slechts 1 koppel en 3 toerentallen getest om de beschikbare hoeveelheid pure ethanol niet al te zwaar te hypothekeken.

### 10.2.2 Vergelijking van één werkingspunt

In tabel 10.4 zijn de meetresultaten weergegeven voor de 4 isostoichiometrische blends A tot D met daarnaast ook de resultaten van de vergelijkende referentiemeeting. Deze waarden horen allen bij het meetpunt 40 Nm en 2500 rpm.

#### Prestaties

Voor de ontstekingstiming worden geen significante verschillen waargenomen bij 40 Nm en 2500 rpm. Dit ligt in de lijn der verwachting zoals besproken in de vorige paragraaf, waarbij het vermoeden van een constante vlamsnelheid voor alle mengsels enigszins bevestigd wordt. Op figuur 10.1 zijn de pV-diagrammen weergegeven voor de 4 GEM-mengsels. Er zijn slechts weinig verschillen merkbaar tussen de mengsels. Bij inzoomen op het verbrandingsgedeelte van de cyclus wordt de minst isochore verbranding waargenomen voor E85, maar dit verschil is zo klein dat het slechts een verwaarloosbaar effect zal hebben op de prestatieparameters. Voorts wordt een merkwaardige afwijking van de polytroop in het compressieverloop bemerkt bij het B-mengsel alsook een licht verlaagde inlaatdruk. Zoals in bijlage Meetresultaten vermeld, kan dit een gevolg zijn van een mogelijke afwijking van het TDC.

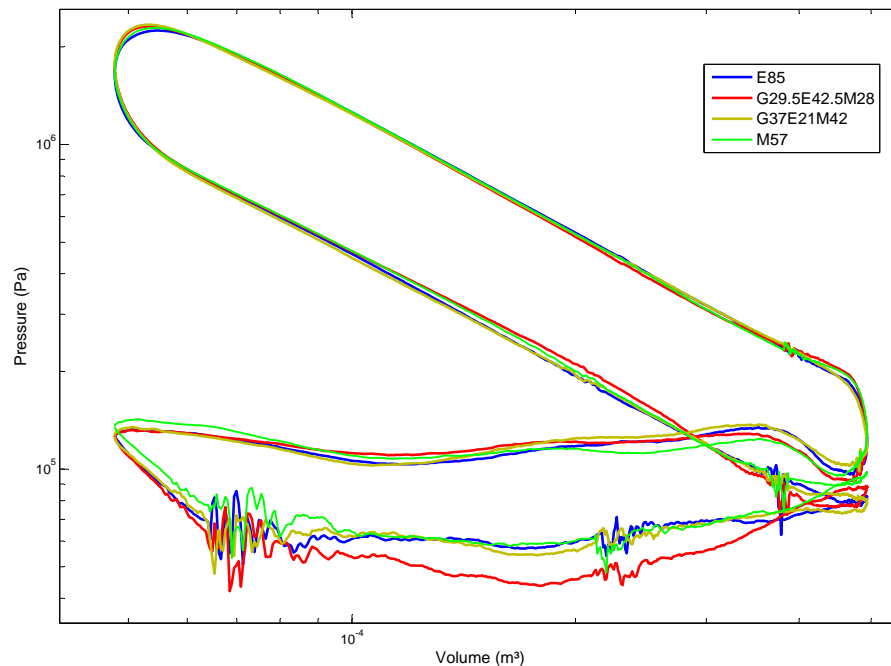
Een eerste opvallende vaststelling in tabel 10.4 is het sterk verlaagde effectieve ren-

	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>C</b>
	<b>G15</b>	<b>G29.5</b>	<b>G37</b>	<b>G43</b>	
	<b>E85</b>	<b>E42.5</b>	<b>E21</b>	<b>E0</b>	<b>Referentie</b>
<b>Eigenschap</b>	<b>M0</b>	<b>M28</b>	<b>M42</b>	<b>M57</b>	
$\lambda$ [-]	1	1	1	1	1
MBT [ $^{\circ}$ ca BTDC]	26	27	26	26	26
Gasklepstand (TP) [%]	21.1	19.6	18.8	20.0	19.9
Luchtstroom (MAF) [g/s]	14.49	14.38	14.30	14.65	15.05
Inlaattemperatuur [ $^{\circ}$ C]	29.7	29.6	30.8	30.8	29.4
Uitlaattemperatuur [ $^{\circ}$ C]	682.2	678.3	684.7	684.4	683.5
$\eta_{\text{eff}}$ [%]	24.36	24.50	24.04	24.09	23.25
$\delta\eta_{\text{eff}}$ [%]	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
BSFC [g/ekWh]	505.93	498.39	504.94	506.19	520.18
$\delta BSFC$ [g/ekWh]	8.1	8.0	8.2	8.0	8.3
$\eta_{\text{vol}}$ [%]	34.29	34.21	33.78	34.91	35.93
$\delta\eta_{\text{vol}}$ [%]	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
$\text{NO}_x$ [g/ekWh]	12.95	15.20	14.01	15.05	14.53
$\delta\text{NO}_x$ [g/ekWh]	0.5	0.6	0.5	0.6	0.6
$\text{CO}_2$ [g/ekWh]	1033.16	1031.82	1039.43	1042.49	1073.90
$\delta\text{CO}_2$ [g/ekWh]	27.5	27.9	27.5	27.9	28.9
CO [g/ekWh]	16.55	13.50	21.43	17.83	20.16
$\delta\text{CO}$ [g/ekWh]	8.4	8.6	8.5	8.6	9.0

Tabel 10.4: Vergelijking verschillende ethanol/watermengsels bij 40 Nm en 2500 rpm

dement van het referentiemengsel ten opzichte van het aangekochte C-mengsel. Dit kan te wijten zijn aan een hogere voorgemengde ethanolconcentratie in de benzine die aan de pomp getankt werd. Zoals reeds besproken in de opbouw naar de resultaten toe werd een lagere AFR voor deze benzine vastgesteld en is het dus plausibel dat deze extra alcoholinhoud in een verlaagde LHV resulteert. Dit betekent op zijn beurt dan weer een penaliserende invloed op het effectieve rendement aangezien deze met een constante LHV voor benzine berekend werd. Desondanks deze sterke reductie bekomen voor dit meetpunt dient vermeld te worden dat het effectieve rendement nog steeds een hogere waarde heeft dan die voor benzine, zie ook het vorige hoofdstuk.

Deze theorie wordt gesteund door de vaststelling van een verhoogde gasklepstand en dito volumetrische rendement. De verlaagde LHV zorgt dat een hogere gasmengseltoevoer vereist is om eenzelfde vermogen te kunnen leveren. Om een dergelijke hogere stroming te verkrijgen dient de gasklep verder opengesteld worden. De hiermee gepaarde verhoogde stroming en gereduceerde ladingsverliezen resulteren in een bonus voor het volumetrische rendement.



Figuur 10.1: Loglog pV diagram van de verschillende GEM-mengsels bij 40 Nm en 2500 rpm

Het is evident dat ook de BSFC eenzelfde trend zal tentoonspreiden als het effectieve rendement, met dus over het algemeen een beperkt verschil tussen de 4 mengsels onderling. Dit specifieke brandstofverbruik verhoudt zich zoals verwacht als een gemiddelde waarde tussen pure benzine en de waarden voor de pure alcoholen. Gezien het isostoichiometrisch zijn met E85 is het dan ook niet meer dan logisch dat wanneer het gemiddelde van de BSFC over alle mengsels genomen wordt, deze waarde ongeveer 10% lager is in vergelijking met die voor puur ethanol.

### Emissies

Ook hier worden de emissies gepresenteerd in de grootte  $[g/ekWh]$  om de vergelijking met andere proefstanden te vergemakkelijken.

Voor de  $CO_2$ -uitstoot zullen dezelfde effecten als besproken bij het effectieve rendement hun invloed hebben op de specifieke emissies. Dit is ook duidelijk te zien aan de hand van de hoge waarde van de referentiemeting. Voor dit meetpunt kunnen echter geen significante besluiten genomen worden met betrekking tot het verschil tussen de 4 mengsels aangezien de resultaten hiervoor allen binnen de experimentele fout liggen. Ook aan de CO-emissies kan geen significante invloed toegewezen

worden gezien de grote foutvlaggen.

De waarden van NO<sub>x</sub>-emissies verschillen significant in functie van de mengsamenstelling. Hier en ook bij de komende bespreking van de invloed van toerental en belasting valt het op dat de vorming van NO<sub>x</sub> bij E85 lager is dan bij M57. Gezien de zo goed als gelijktijdige ontstekingstiming wordt voor de verklaring naar het koel-effect gekeken. Op figuur 10.8a is een zo goed als onveranderd temperatuurprofiel te zien, maar de cijferresultaten leren ons dat er een lichte stijging is bij stijgend benzinegehalte (zie ook de volledige resultaten in bijlage D). Ook de inlaattemperaturen lijken over het algemeen deze conclusie te bevestigen, hierover in de volgende paragraaf echter meer. De vergelijking tussen het aangekochte C-mengsel met de referentiemeting lijkt de voorgaande discussie tegen te spreken in dit werkingspunt, maar deze afwijking bevindt zich binnen de experimentele fout.

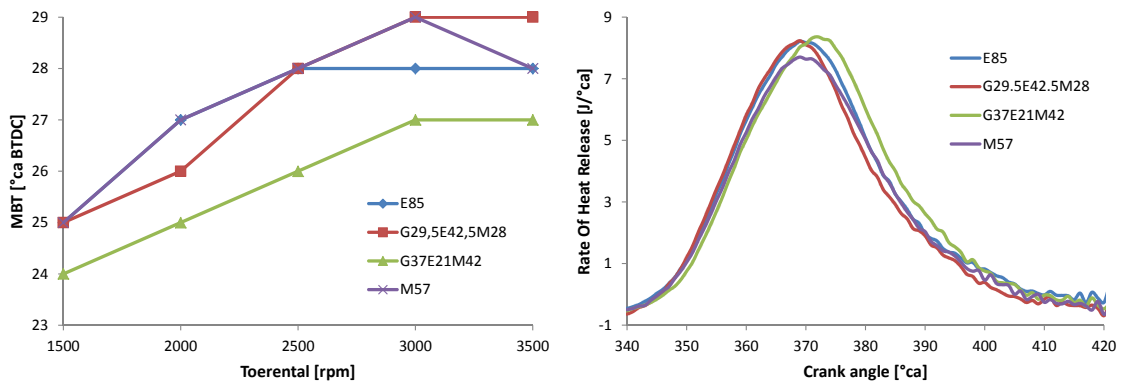
### 10.2.3 Evolutie met toerental en belasting

Na de bespreking van het ene meetpunt wordt nu gekeken of het toerental en de belasting grotere afwijkingen tot gevolg zullen hebben. De voornaamste trends worden hier aan de hand van grafieken gedemonstreerd. In bijlage D en op de bijgevoegde DVD zijn de volledige meetresultaten en de prn-bestanden met de drukmetingen terug te vinden.

#### Prestaties

Net als bij de bespreking van één werkingspunt worden over alle toerentallen en belastingen geen grote verschillen in ontstekingstiming opgemerkt. In die mate zelfs, dat de maximale afwijking telkens 1 graad kh (krukhoek) bedraagt. Uitzondering op deze regel is het aangekochte C-mengsel dat bij lage belasting een constant latere ontstekingstiming liet optekenen. Ook al is de afwerking telkens maximaal 2 graden kh, de trend over het volledige toerentalbereik is duidelijk aanwezig (zie ook figuur 10.2a). Een mogelijke verklaring hiervoor kan de benzinesamenstelling zijn, waarbij het plausibel lijkt dat klopresistentie verbeterende additieven in de benzine van het C-mengsel zorgen voor een verlate MBT-timing. Wanneer gekeken wordt naar de warmtevrijstelling (figuur 10.2b) wordt echter geen verhoogde verbrandingssnelheid vastgesteld. Bij dergelijke lage belastingen is het is mogelijk dat bij het instellen van de ontstekingstiming er een lichte afwijking optreedt, deze beoordeling gebeurt dan ook door de operator aan de hand van de koppelwaarde. Bij hogere belasting vallen de andere mengsels en de referentiemeting zo goed als tezamen met het resultaat voor G37E21M42.

Figuren 10.3a, 10.3c en 10.3e geven het verloop van de effectieve rendementen voor



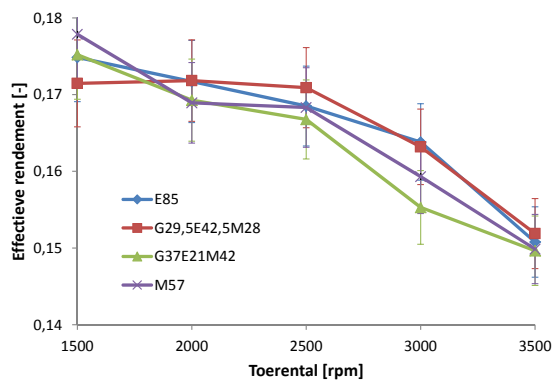
(a) MBT ontstekingstiming bij 20 Nm      (b) Rate Of Heat Release bij 20 Nm en 2500 rpm

Figuur 10.2: MBT en ROHR van verschillende GEM-mengsels bij 20 Nm

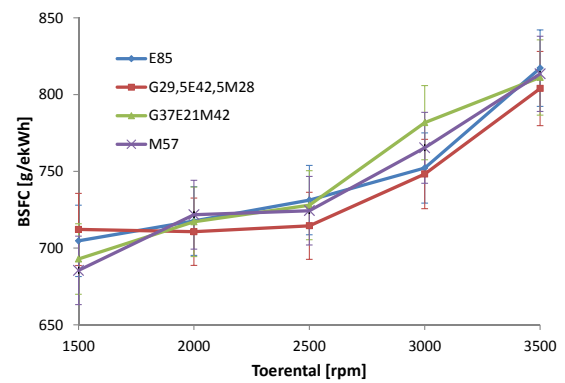
het volledige meetbereik. De optredende verschillen in functie van de mengselsamenstelling vallen zo goed als allemaal binnen de experimentele foutvlaggen. Er kan dus met enige zekerheid gesteld worden dat de isostoichiometrische ternaire mengsels over zo goed als het volledige meetbereik een gelijkwaardig effectief rendement behalen. Dit werd ook zo verwacht gezien de beperkte verschillen in ontstekingstiming en fysische grootheden met betrekking tot het koeffect. Dat het koeffect inderdaad ook geen significante verschillen vertoont is te zien op figuren 10.8a en 10.8b. Een over het algemeen lagere waarde voor het effectieve rendement van M57 kan verklaard worden met de eerder besproken lagere LHV van de getankte Euro95. Dit was bij de bespreking van één werkingspunt ook de verklaring voor het lager liggen van het effectieve rendement van de referentiemeting. Deze conclusie kan voor de 3 uitgevoerde toerentallen in de beperkte meetset bevestigd worden.

Het enige punt waar de verschillen wel significante proporties aannemen is bij een belasting van 80 Nm en een toerental van 1500 rpm. Over het ganse toerentalbereik bij de hogere belasting lijkt het alsof er een shift van het verloop heeft plaatsgevonden waarbij het maximum naar hogere toerentallen verschuift in functie van toenemende hoeveelheid ethanol. Dit kan te wijten zijn aan een toenemende invloed van het koeffect bij dalende benzinegehalte in de brandstof. Desalniettemin geven figuur 10.8a en 10.8b aan dat de uitlaattemperatuur slechts licht daalt en de inlaattemperatuur zelfs een omgekeerde trend vertoont.

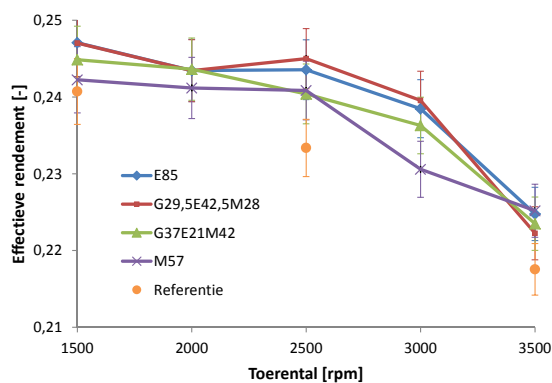
Een mogelijke verklaring voor deze merkwaardige trend in de inlaattemperatuur kan gevonden worden in het verloop van de destillatiecurve (zie sectie 4.4.2). Hierbij wordt de veronderstelling gemaakt dat de inlaatkleppen op een voldoende hoge temperatuur staan (*steady-state* werking van de motor) waardoor de invloed kan gezocht worden bij de hoogste temperaturen van de destillatiecurve. Hier stelt men



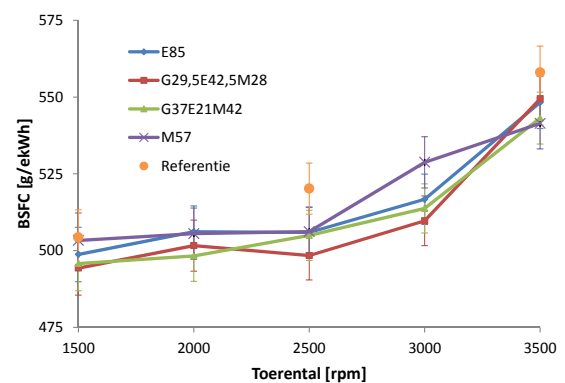
(a) 20 Nm



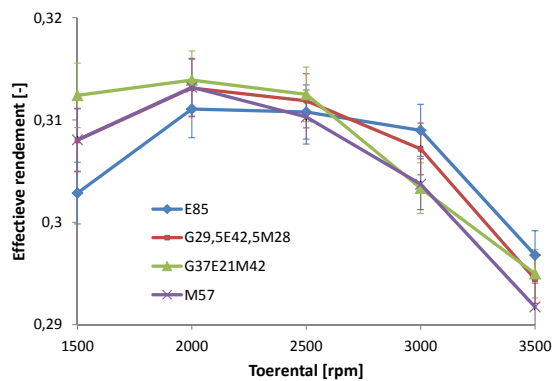
(b) 20 Nm



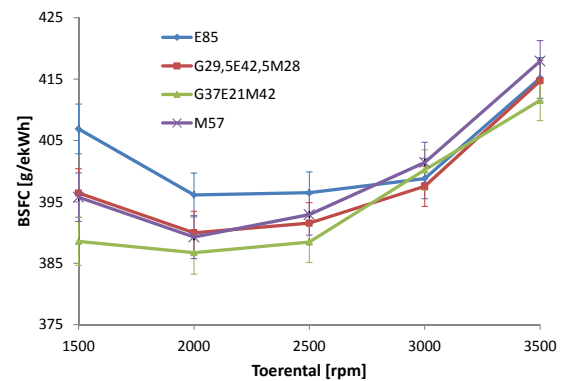
(c) 40 Nm



(d) 40 Nm



(e) 80 Nm



(f) 80 Nm

Figuur 10.3: Effectief rendement en BSFC bij verschillende belastingen

vast dat de temperatuur waarbij het volledige mengsel verdampt duidelijk stijgt met een toenemend benzinegehalte. Bij een stijgend toerental zal de temperatuur in de cilinder stijgen door een kortere tijdsperiode voor warmteoverdracht en door hogere wrijvingsverliezen, wat resulteert in een hogere temperatuur in de cilinder en van de inlaatklep waardoor er nog een groter percentage mengsel zal kunnen verdam-

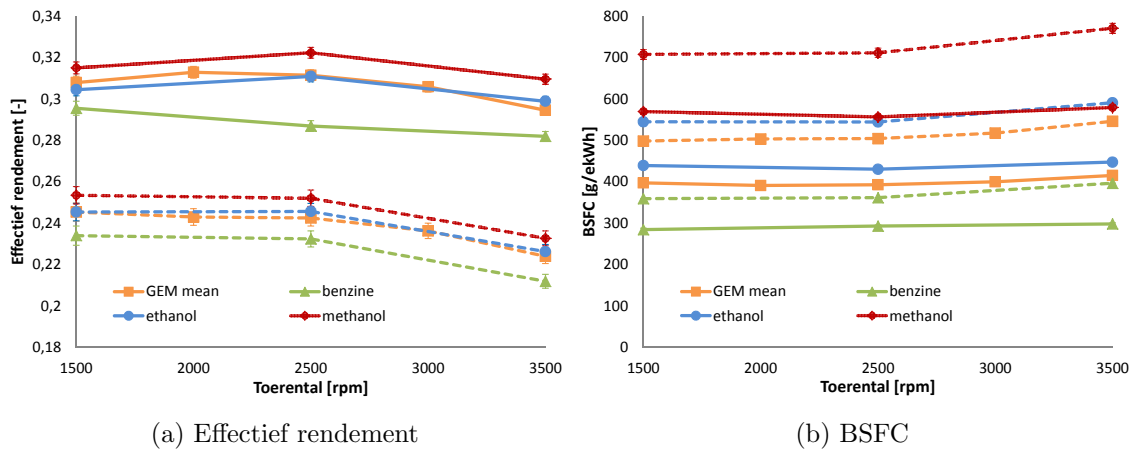
pen. Gezien het verloop van de destillatiecurve heeft deze stijging duidelijk minder invloed voor het E85-mengsel ten opzichte van het M57-mengsel en is er dus een kleinere stijging in koelvermogen.

Wat betreft de algemene invloed van toerental en belasting op de resultaten van het effectieve rendement kunnen gelijkaardige conclusies getrokken worden als in de vorige hoofdstukken. Deze invloeden zijn dan ook inherent aan de proefstand of standaard motorwerking en kunnen minder toegeschreven worden aan de samenstelling van de mengsels, zeker als de mengseleigenschappen slechts in dergelijk beperkte mate verschillen. Praktisch houdt dit in dat bij hoge toerentallen het effectief rendement in navolging van het mechanisch rendement zal dalen door het toenemen van de wrijvingsverliezen. Bij stijgende belasting zal er een significant grote stijging van het effectief rendement zijn, door toename van zowel mechanisch rendement door hogere piekdrukken en geïndiceerd rendement door het meer openstaan van de gasklep. Op figuur 10.4a wordt ook nog eens de vergelijking met benzine en de componenten gemaakt met een gemiddelde waarde voor de GEM-blends om de figuur overzichtelijk te houden. Dit is mogelijk gezien de beperkte rendementsverschillen tussen de mengsels onderling. Het mag duidelijk wezen dat de GEM-mengsels over het volledige motorbereik betere prestaties leveren die zelfs even goed zijn als voor pure ethanol. Bij de hogere belasting is er een duidelijk verhoogde rendementswinst ten opzichte van benzine, te wijten aan een versterkte invloed van het koeffect van de alcoholhoudende brandstoffen bij stijgende belasting.

Hier opnieuw direct de kanttekening dat deze rendementswinst een prijs heeft, namelijk het gereduceerde rijbereik van de wagen die van deze alcoholhoudende mengsels gebruik maakt. De vergelijking tussen de GEM-mengsels onderling is te zien op de figuren 10.3b, 10.3d en 10.3f. Figuur 10.4b toont de penalisatie van BSFC voor mengsels en pure alcoholen ten opzichte van benzine. Hierbij zijn de belasting van 40 Nm (stippellijn) en 80 Nm (volle lijn) getoond. De opvallende en aangename conclusie is dat de ternaire mengsels zoals verwacht een gunstigere BSFC hebben terwijl de prestaties gelijkwaardig zijn aan die van puur ethanol.

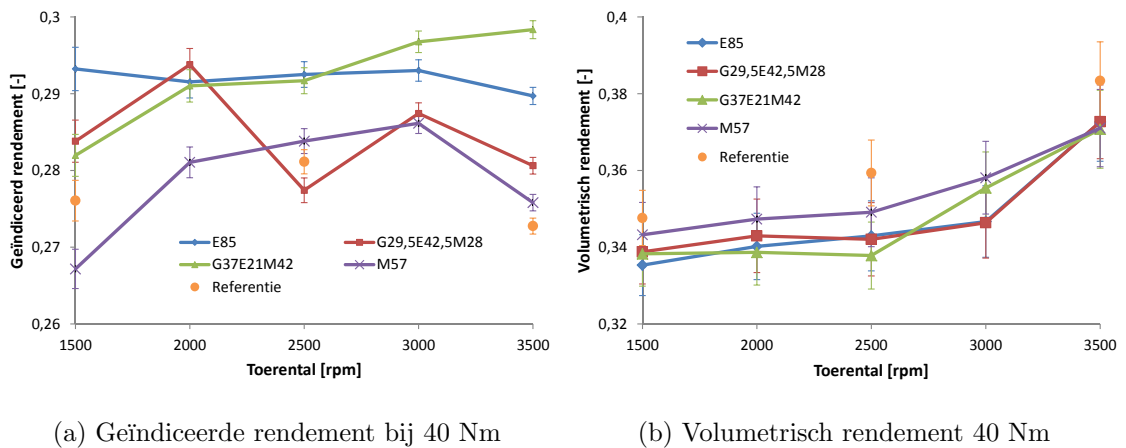
Net als bij de bespreking van het werkingspunt bij 2500 rpm toont figuur 10.5b van het volumetrisch rendement over het volledige toerentalbereik bij 40 Nm een beperkte invloed tussen de mengsels onderling met uitzondering van de referentiemeting. Deze conclusie geldt evenzeer voor de andere twee belastingen. Verder wordt zoals verwacht een stijging met toerental en koppel waargenomen door toenemen van het stromingsdebiet. Dit wordt in beperkte mate beïnvloed door het effectief rendement, aangezien er minder lucht-brandstofmengsel vereist wordt en de gaskleppositie dusdanig dient aangepast te worden. Ook zal hier opnieuw de trade-off plaatsvinden tussen het dener worden van de stroming door het koeffect met





Figuur 10.4: Effectieve rendement en BSFC bij 40 en 80 Nm

als gevolg het meer moeten sluiten van de gasklep.



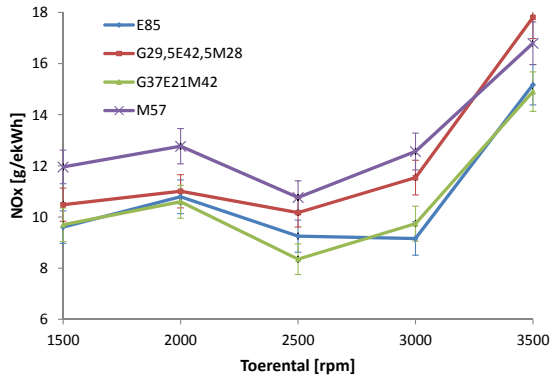
Figuur 10.5: Geïndiceerde en volumetrisch rendement bij 40 Nm

De enige invloed op het geïndiceerd rendement die significant te noemen is bestaat uit een stijging in functie van de belasting. Dit is logisch aangezien bij hogere belasting de gasklep minder gesloten dient te worden, dit heeft een rechtstreeks effect op het effectieve rendement zoals reeds eerder besproken.

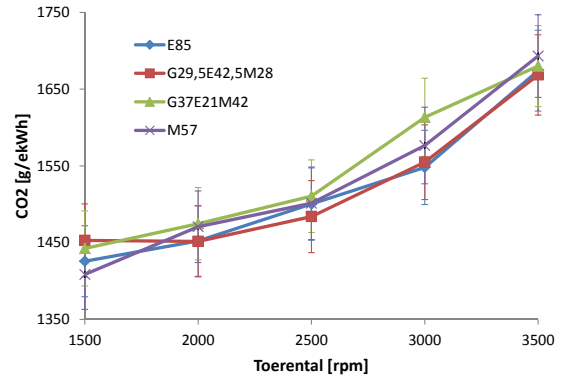
## Emissies

Bij de vergelijking van één werkingspunt werd reeds een invloed van benzinegehalte op de vorming van  $\text{NO}_x$  gemeld. Deze trend geldt voor het volledige belasting- en toerentalbereik, zoals duidelijk te zien is op figuren 10.6a, 10.6c en 10.6e, waarbij E85 enkel bij 20 Nm niet de laagste  $\text{NO}_x$ -emissie laat noteren. Bij deze lage belasting heeft het effect van verlengde verblijfsduur van de eindgassen in de cilinder een

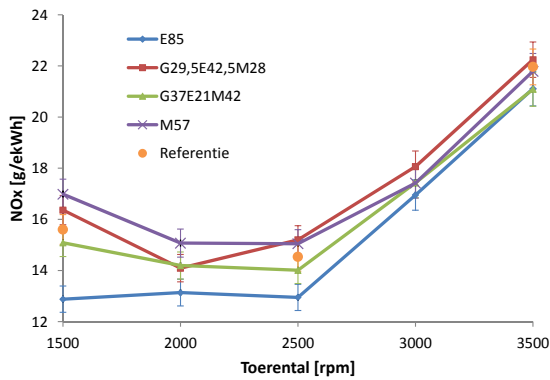
relatief grotere invloed op de  $\text{NO}_x$ -vorming dan bij hogere belasting. De uitgestelde MBT-timing voor het C-mengsel resulteert hier dus in een lagere  $\text{NO}_x$ -emissie dan de waarde voor E85.



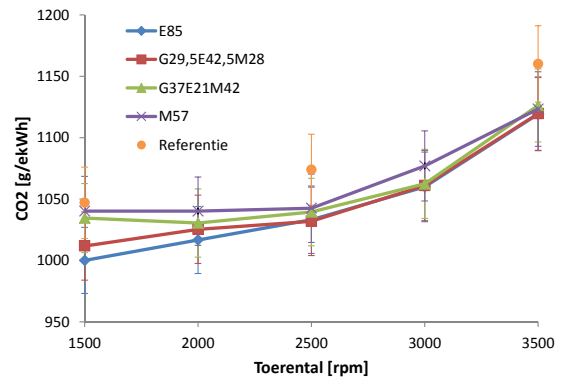
(a) 20 Nm



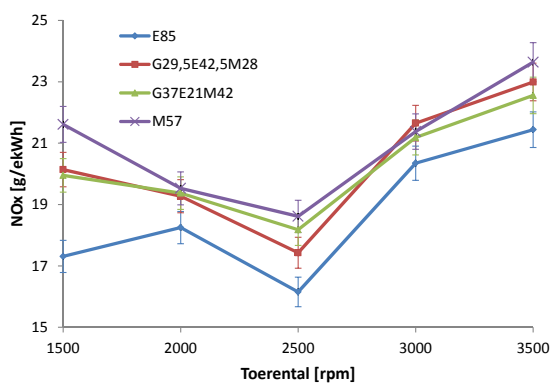
(b) 20 Nm



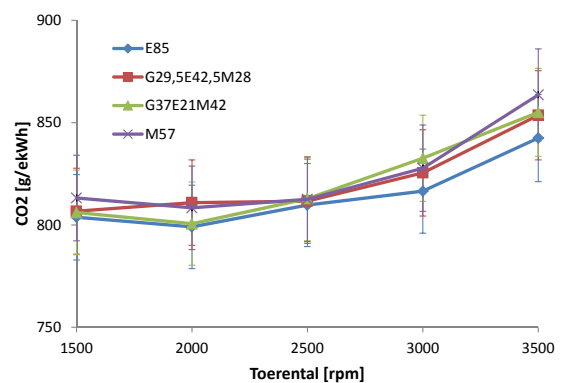
(c) 40 Nm



(d) 40 Nm



(e) 80 Nm



(f) 80 Nm

Figuur 10.6:  $\text{NO}_x$ - en  $\text{CO}_2$ -emissies bij verschillende belastingen

Figuur 10.8a toont het verloop van de uitlaattemperatuur bij 80 Nm. Interessant om hierbij op te merken is dat er een stijging wordt waargenomen met verhoogde belas-

ting, in tegenstelling tot de resultaten van het experiment op ethanol-watermengsels. Het is bij deze duidelijk dat het koeffect bij de GEM-mengsels een minder drastisch resultaat zal opleveren dan bekomen werd door het toevoegen van water. Bij zorgvuldig bestuderen van het verloop met het toerental wordt een trend waargenomen die aangeeft dat een hogere benzine-inhoud een bescheiden stijging in uitlaattemperatuur oplevert. Bij de lagere toerentallen van de meetset bij 80 Nm wordt deze stelling bijgestaan door de resultaten van de inlaattemperatuur. Bij de hogere toerentallen doet zich het eerder besproken fenomeen met omgekeerde trend voor.

Daar de ontstekingsstijging enkel een grote afwijking vertoont bij 20 Nm voor het C-mengsel wordt voor de geobserveerde invloed van het benzinegehalte naar deze lichte variatie in temperatuur gekeken. Er zijn op dit moment geen gegevens bekend over adiabate vlamtemperaturen van ternaire mengsels. Als de gemiddelde uitlaattemperatuur als indicator voor de piektemperatuur in de cilinder gebruikt wordt<sup>4</sup> kan op deze manier de significant verhoogde NO<sub>x</sub>-vorming voor M57 ten opzichte van E85 verklaard worden. Voor veel van de ingestelde meetpunten vallen de verschillen echter binnen de experimentele fout, waarbij dit vooral bij hoger toerental merkbaar is.

Figuur 10.7a toont de vergelijking met de metingen op benzine (Euro95) bij 40 Nm die in het vorig hoofdstuk besproken werden. Het is duidelijk dat een significante vermindering tot zelfs 26% kan geboekt worden voornamelijk door het verlagen van de piektemperatuur met behulp van het koelende effect van de alcoholen. Deze reductie vergroot bij hoger toerental, bij het hoogste gemeten toerental blijkt deze invloed in vergelijking met benzine van minder belang te worden. Hierbij wordt dan gekeken naar de verkorte verblijfstijd van de verbrandingsgassen bij hoge temperatuur waarvan de benzine ook kan profiteren en zodus het relatieve voordeel voor de GEM-mengsels vermindert.

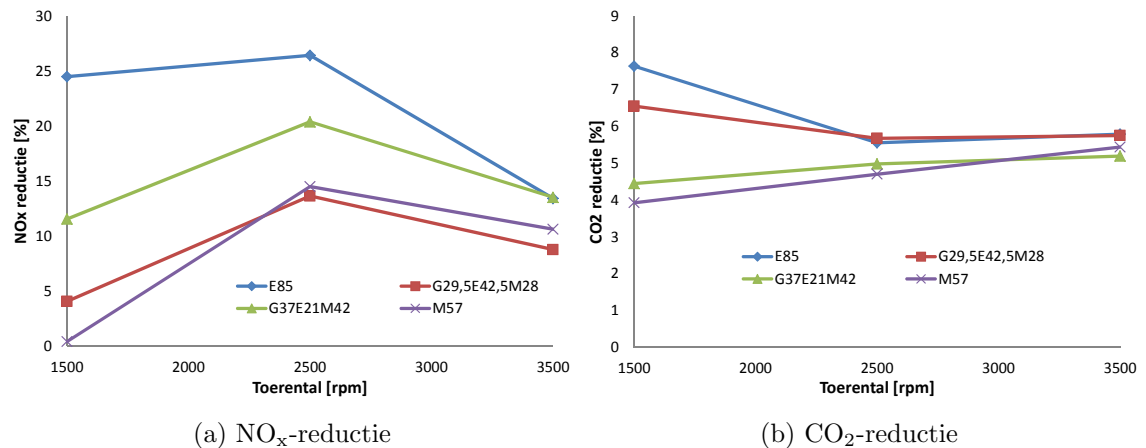
De invloed van toerental en belasting is ook voor deze emissieresultaten voornamelijk gerelateerd aan de standaard motorwerking en is analoog aan de besprekingen in vorige hoofdstukken. Wel is er een meer uitgesproken kwadratische trend in functie van het toerental bij stijgend benzinegehalte in het mengsel. Dit vertaalt zich vooral in hogere NO<sub>x</sub>-emissie bij lager toerental, om dezelfde redenen als hiervoor besproken bij de vergelijking met pure benzine. Bij stijgende belasting zullen verhoogde piektemperaturen en toegenomen interne EGR (door verhoogde onderdruk in de inlaat) resulteren in meer NO<sub>x</sub>-vorming.

Een laatste opvallende vaststelling is dat het B-mengsel relatief hoge waarden vertoont. Wanneer zoals in voorgaande hoofdstukken ook de derde beheersende factor

---

<sup>4</sup>bij de veronderstelling dat de MBT-waarden en verbrandingssnelheid van de verschillende GEM-mengsels zo goed als gelijk zijn

voor  $\text{NO}_x$ -vorming erbij gehaald wordt - de aanwezigheid van zuurstof - valt het op dat voor deze brandstof een stuk armer gewerkt wordt (zie figuur 10.9b). Bij de andere toerentallen is zoals bij de drie andere mengsels een opmerkelijke stijging van de berekende  $\lambda$  met toerental merkbaar. Ook hier kan een niet nauwkeurige werking van de lambdasensor voor dergelijke mengsels dus de oorzaak zijn van een afwijkend resultaat.



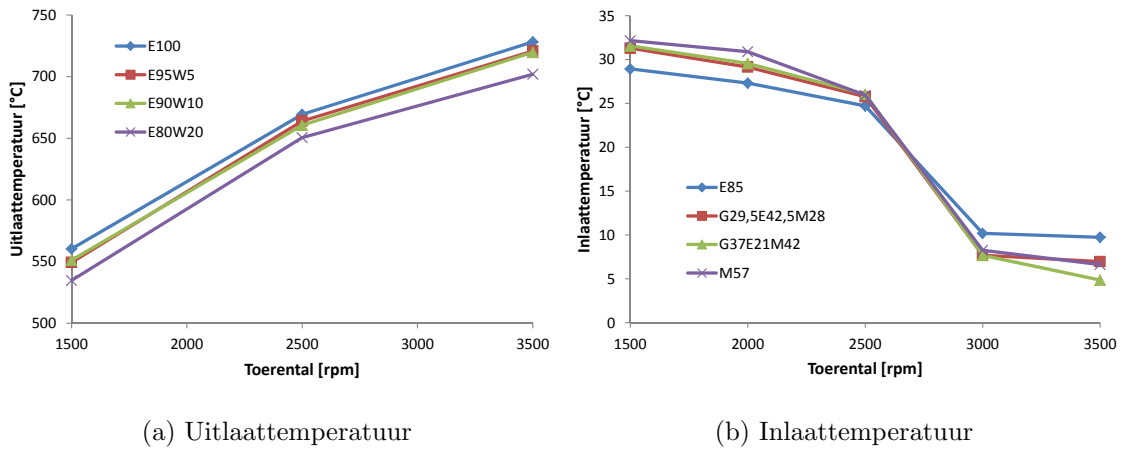
Figuur 10.7: Reductie van  $\text{NO}_x$ - en  $\text{CO}_2$ -emissies t.o.v. benzine bij 40 Nm

Voor de resultaten van de  $\text{CO}_2$ -uitstoot ziet het ernaar uit dat de invloed van de mengselsamenstelling geen significante verschillen oplevert bij zo goed als alle meetpunten. Er kan echter een licht stijgende trend in functie van de benzine-inhoud bemerkt worden. Met een weinig variërend effectief rendement wordt de verklaring gezocht bij de koolstofintensiteit die zoals besproken bij de verwachtingen licht stijgt met toenemend benzine- (en methanol)gehalte (zie ook tabel 10.1). De variatie in functie van toerental en belasting van de specifieke emissies is sterk gelinkt aan het effectieve rendement, wat ook direct het afwijkende resultaat voor de referentiemeeting verklaart.

Zoals reeds vermeld wordt sinds kort een ternair GEM-mengsel gebruikt als brandstof in de racerij, met name in de FIA Junior WRC. Bij het aankondigen van deze samenwerking werd een reductie in  $\text{CO}_2$ -uitstoot van 70% ten opzichte van standaard benzine gerapporteerd<sup>5</sup>. Wanneer hier de vergelijking gemaakt wordt op basis van de resultaten hier bekomen en de resultaten van vorig hoofdstuk wordt echter een minder verregaande daling geconstateerd. Deze referentiewaarde werd bekomen uit een *well-to-wheel* analyse en betreft dus ook het duurzame aspect van de productie in de berekening. Zowel bij middelhoge als lage belasting wordt hier bij onze meetset een maximale reductie van 8% bekomen ten opzichte van benzine. Desal-

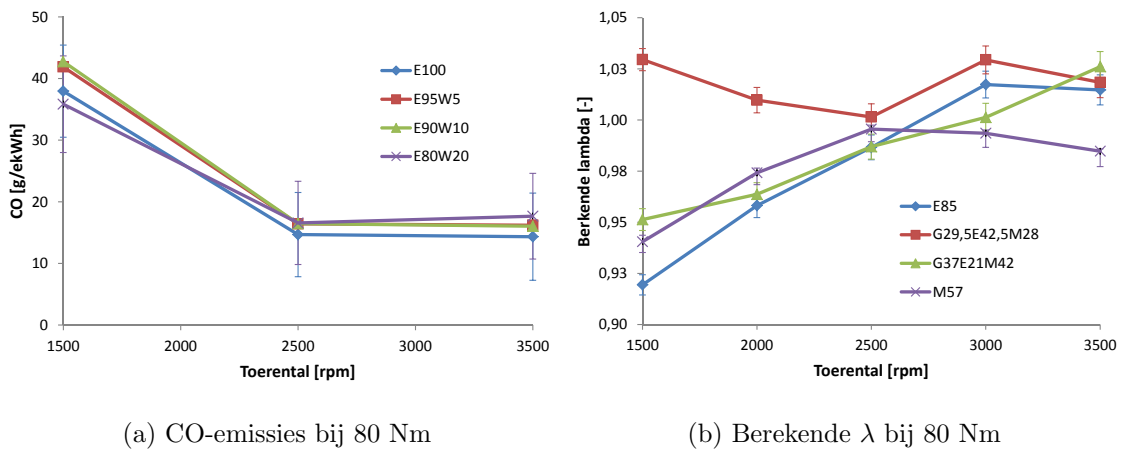
<sup>5</sup><http://gutts.nl/nieuws/>, artikel WRC van [20/05/2013]

niettemin zijn dit nog steeds zeer mooie resultaten die het duurzame karakter van de GEM-blends nogmaals in de verf zetten.



Figuur 10.8: Uitlaat- en inlaattemperatuur bij 80 Nm

De enige quasi-significante variatie bij de CO-emissies geldt voor E85 bij 80 Nm en lage toerentallen. Zoals te zien op figuur 10.9a is dit resultaat volledig analoog aan de bespreking van de componenten in hoofdstuk 9 waarbij voor een hoog ethanolgehalte een inaccurate werking van de lambdasensor tot afwijkende meetresultaten leidt.



Figuur 10.9: Uitlaat- en inlaattemperatuur bij 80 Nm

### 10.3 Conclusie

De belangrijkste resultaten bekomen uit de experimenten die in dit hoofdstuk werden besproken kunnen als volgt samengevat worden:

- Bij gebruik van de hier geteste isostoichiometrische mengsels kunnen flex-fuel voertuigen zonder problemen en met gelijkblijvende prestaties functioneren. Hiermee is het belangrijkste gedeelte van de hypothese die aan het begin van dit hoofdstuk voorgesteld werd bewezen.
- Ondanks het negatieve aspect van een verkleinde actieradius zijn de rendementswinsten ten opzichte van benzine een belangrijke drijfveer bij het gebruik van alcoholhoudende brandstoffen. De vergelijking met de resultaten van het vorige hoofdstuk leert ons dat voor alle GEM-mengsels eenzelfde rendement bekomen wordt als voor pure ethanol. Een stijging in het effectieve rendement van 1 tot 2 %<sub>pt</sub> over het volledige motorbereik is reeds een uitstekend resultaat voor een motorproefstand met een beperkte compressieverhouding.
- Voor de NO<sub>x</sub>-emissies wordt wel degelijk een invloed van de mengselsamenstelling waargenomen waarbij deze het sterkst uitgesproken is bij laag toerental. Hoe hoger het benzinegehalte in de brandstof, hoe lager het koelend effect en dus hoe hoger de NO<sub>x</sub>-vorming. Ten opzichte van benzine kunnen reducties tot 26% bekomen worden. Deze emissies zijn gezien deze benzine-afhankelijkheid wel kleiner dan deze gehaald bij de pure alcoholen.
- Een over het volledige meetbereik vastgestelde vermindering van CO<sub>2</sub> uitstoot tot 8% versterkt de reputatie van GEM-mengsels als duurzame brandstof.

In het volgende hoofdstuk wordt de klopresistentie van alcoholen en ternaire mengsels bestudeerd en zal blijken of deze brandstoffen zoals verwacht toelaten om bij een hogere compressieverhouding gebruikt te worden. Dit gecombineerd met oplading en directe injectie maakt de baan vrij voor nog meer doorgedreven rendementswinsten. Het staat wel reeds vast dat ternaire isostoichiometrische mengsels een geldig alternatief of aanvulling zijn voor binaire mengsels zoals E85. Het feit dat deze brandstoffen het potentieel hebben om het volume hernieuwbare brandstoffen te doen toenemen zonder de biomassalimiet te confronteren maakt dat deze conclusie in de praktijk een grootschalig positief effect kan teweegbrengen op de impact die de transportsector heeft op het milieu.

## Hoofdstuk 11

# GEM: Klopgedrag

In het vorige hoofdstuk 10 werden de prestaties en emissies van enkele isostoichiometrische ternaire mengsels getest op een motorproefstand en uitgebreid besproken. Hierbij lijken de minieme verschillen tussen de geteste mengsels de hypothese van Turner et al. wel degelijk te bevestigen. In een vervolgstudie [43] over eigenschappen en emissies van deze mengsels stelden ze een opmerkelijk gedrag van de klopperelateerde RON- en MON-getallen vast. Deze bleken namelijk een opvallend constante waarde te vertonen, wat zeer onverwacht was en tegelijk zeer aangenaam voor de zogenaamde 'onzichtbaarheid' van deze ternaire mengsels. In dit hoofdstuk wordt hieromtrent een beperkte meetset uitgevoerd op de Audi-proefstand om zo bij motorwerking het klopgedrag van deze mengsels en van zijn basiscomponenten afzonderlijk te verifiëren.

### 11.1 Verwachtingen

Zoals reeds vermeld in hoofdstuk 9 is één van de interessantste eigenschappen van alcoholen ten opzichte van benzine hun hoge klopperesistentie, mede door hun grote koeffect en verhoogde zelfontstekingstemperatuur. Hierdoor kan men de motorprestaties verbeteren door een hogere CR-waarde te gebruiken wat onmiddellijk een hoger piekrendement met zich meebrengt. De MBT-timing kan in een groter deel van het motorbereik gehandhaafd worden en een agressieve downsizing kan worden verwezenlijkt, zonder de nood om een rijk brandstofmengsel te moeten gebruiken bij hogere belastingen.

In tabel 11.1 vindt men enkele interessante eigenschappen [5, 3, 7] van de verschillende ternaire mengsels en de basiscomponenten met betrekking tot hun klopperesistentie.

Eén van de meest gebruikte eigenschappen om het klopgedrag van een brandstof te

	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>MeOH</b>	<b>EtOH</b>	<b>Benzine</b>
	<b>G15</b>	<b>G29.5</b>	<b>G37</b>	<b>G43</b>			
	<b>E85</b>	<b>E42.5</b>	<b>E21</b>	<b>E0</b>			
	<b>M0</b>	<b>M28</b>	<b>M42</b>	<b>M57</b>			
AFR <sub>stoich</sub> [kg/kg]	9.72	9.76	9.80	9.73	6.43	8.95	14.4
$\Delta h_{\text{vap}}$ [kJ/kg]	756.6	751.5	747.5	754.5	1100	838	180 - 350
LV per kg lucht bij $\lambda=1$ [kJ/kg]	77.8	77.0	76.3	77.5	171.1	93.6	12.5 - 24.3
RON [-]	109.0	108.7	108.5	108.2	111	108	95/98

Tabel 11.1: Klopgerelateerde eigenschappen van verschillende brandstoffen

beschrijven zijn het RON- of MON-getal<sup>1</sup>. Indien men dit samen met het koeleffect van een brandstof bekijkt, kan men verwachten dat methanol een significant betere klopresistentie zal vertonen ten opzichte van benzine (Euro95/98). Ook ethanol vertoont eigenschappen die een duidelijke verbetering doen vermoeden ten opzichte van de fossiele brandstoffen. Zoals reeds vermeld in de inleiding stelden Turner et al. een opmerkelijke bevinding vast waarbij het RON-getal voor de volledige range van isostoichiometrische GEM-mengsels zo goed als constant was. Dit lineair gedrag bij mengsels werd voordien nooit eerder vastgesteld en is een verder onderzoek meer dan waard. De opgemeten RON-waarden voor deze mengsels liggen zo goed als gelijk met ethanol waardoor er weinig tot geen verschillen verwacht worden hiermee. Ten slotte zou het kleine verschil in RON-getal van Euro95 en Euro98 ook duidelijk moeten worden uit de experimentele meetset die in dit hoofdstuk wordt besproken.

## 11.2 Audi proefopstelling

Door de robuustheid en hogere compressieverhouding (13:1) van de Audi proefopstelling werd gekozen om de meetset over het klopgedrag op deze motor uit te voeren.

Deze proefstand bestaat uit een eencilindermotor die aangepast is voor werking op benzine, waterstof en alcoholen. Vorig academiejaar werd de compressieverhouding verhoogd naar 13:1 [3] waardoor hij zeer geschikt is om klop uit te lokken bij zowel de benzine als alle alcoholische brandstoffen. Voor details betreffende de hardware en besturing van de DAQ wordt verwezen naar de thesis van Sileghem en Van De Ginste [5]. De specificaties van de proefstand worden gegeven in tabel 11.2.

<sup>1</sup>RON ASTM D2699 en MON ASTM D2700



Cylinders	1
Kleppen	2
Boring	77.5 mm
Slag	86.4 mm
Slagvolume	407.3 cc
Compressieverhouding	13:1
Injection	PFI
Max. toerental	4000 (continu)
Nokkenas	OHC
ECU	Motec M4

Tabel 11.2: Motor eigenschappen Audi

### 11.2.1 Meetprocedure

De meetprocedure voor deze meetset verschilt duidelijk van degene die werd gebruikt in de vorige hoofdstukken 8, 9 en 10. Het hoofddoel van de meetset is om enkel het klopgedrag te bestuderen en er werden dus geen verbruiks- en emissiemetingen uitgevoerd. Om eenvoudig klop te kunnen uitlokken bij het volledig arsenaal aan beschikbare brandstoffen werd gekozen voor een meetpunt met middelhoge belasting en laag toerental. Hiermee kunnen er tegelijk voldoende onderlinge verschillen in ontstekingsstiming vastgesteld worden en naast de gebruikte klopdetectiemethode kan er ook eenvoudig gedetecteerd worden 'op het gehoor'.

Voor de klopdetectie werd gekozen voor de derde afgeleide methode (van het opgemeten druksignaal). Deze methode is snel en robuust en werd tijdens de vorige thesis [3] geïmplementeerd in het Labview programma van de Audi-proefopstelling. Voor elke brandstof werd het betreffende meetpunt ingesteld bij stoichiometrische omstandigheden, vervolgens werd de ontstekingsstiming vervroegd tot de klop hoorbaar was en tevens gedetecteerd werd in Labview. Om de reproduceerbaarheid te bevorderen, werd er telkens getest of er intense klop hoorbaar was bij nog een extra graad krukhoek vroeger ontsteken. Tegelijkertijd werd de brandstofinspuiting en de gaskleppositie bijgesteld zodat de belasting constant bleef.

Voor een overzicht van deze meetset, zie tabel 11.3.

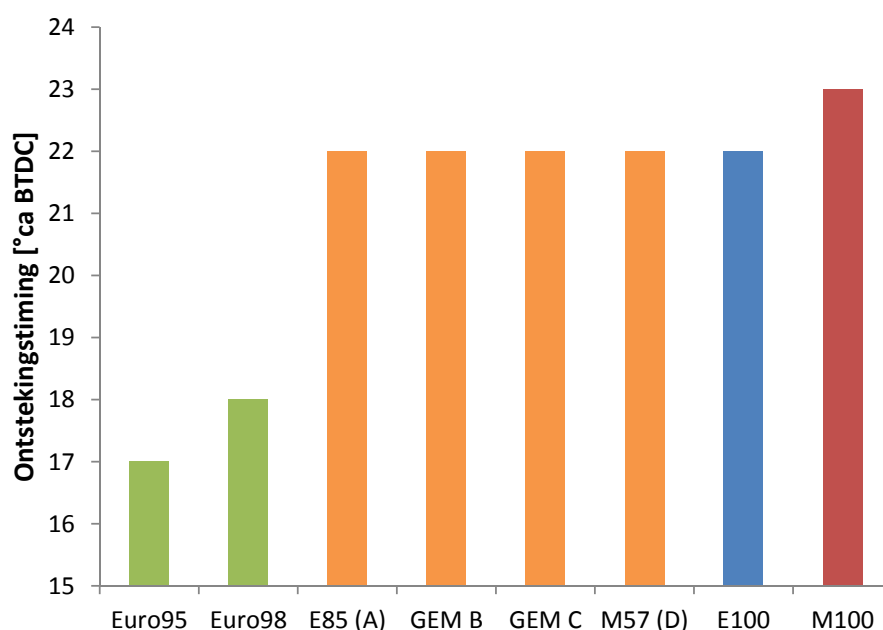
## 11.3 Resultaten

Op figuur 11.1 kan men voor de verschillende brandstoffen het resultaat zien van het klopgedrag experiment. Hierbij werd bij een constante belasting en toerental

$\lambda$	Koppel [Nm]	BMEP [bar]	Toerental [rpm]	Brandstof
1	25	7.713	2000	E85 (A), GEM B, GEM C, M57 (D) Ethanol, Methanol, Euro95 en Euro98

Tabel 11.3: Overzicht meetset klopgedrag

gekeken hoeveel graden krukhoek men de ontsteking kon vervroegen voordat er zowel met de detectiemethode als via het gehoor klop werd vastgesteld.



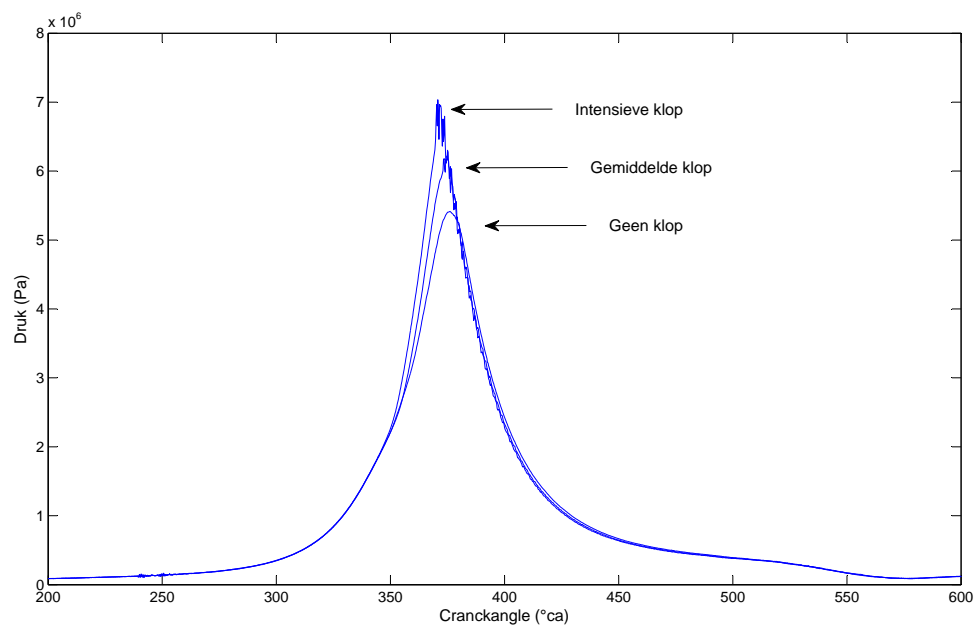
Figuur 11.1: Ontstekingstiming bij kloprens van verschillende brandstoffen

Het is duidelijk te zien dat de (mengsels met) alcoholen een beduidend betere kloppersistentie bezitten dan de twee benzines. Voor methanol kon de ontsteking hierbij 5-6 °kh vervroegd worden voordat de kloprens werd bereikt. Euro98 heeft een iets hoger RON-getal dan Euro95 en dit uit zich in een klein verschil tussen beide benzines.

Zoals reeds in sectie 11.1 besproken, bezit methanol de beste eigenschappen voor kloppersistentie en dit leidde dan ook tot een iets vroegere ontstekingstiming dan bij ethanol. De GEM-mengsels daarentegen vertoonden zeer gelijkaardige eigenschappen met ethanol en dit is ook duidelijk te merken in de grafiek, waarbij voor

alle GEM-mengsels en ethanol dezelfde kloprens werd vastgesteld. Deze constante bij de GEM-mengsels is enerzijds een opvallende eigenschap gezien de grote variatie in samenstelling. Anderzijds lagen de eigenschappen die het koeleffect van de verschillende mengsels bepalen zeer dicht bij elkaar en het is net dit effect dat een grote invloed heeft op de klopresistentie van een brandstof. Deze weliswaar beperkte meetset bevestigt hiermee één van de hoofdpijlers van de hypothese van Turner et al. [7] over de 'onzichtbaarheid' van deze mengsels voor een flexfuelmotor.

Voor deze meetset werden ook cilinderdrukmetingen gedaan om te kunnen verifiëren dat er zich inderdaad klop voordeed. Tijdens zo'n drukmeting worden er 50 opeenvolgende cycli geregistreerd en opgeslagen. Doordat er werd gezocht naar de grens waar klop zich begon voor te doen, vertonen niet alle 50 cycli het klopgedrag. Op figuur 11.2 zijn 3 verschillende cycli uit één meting van het GEM C-mengsel getoond waarbij er duidelijk te zien is dat op deze grens er zowel cycli zijn met normale verbranding, gemiddelde klopintensiteit en hogere klopintensiteit. Het drukverloop van een klopcyclus is gekenmerkt door een snelle compressie van de restgassen die leiden tot hoge druk- en temperatuurpieken. Deze opeenvolgende grillige drukpieken induceren op hun beurt dan akoestische drukgolven die vanaf een bepaalde frequentie en amplitude zorgen voor hoorbare klop [3].



Figuur 11.2: Cilinderdrukmeting GEM C-mengsel

## Hoofdstuk 12

# Conclusie en toekomstperspectief

In dit hoofdstuk wordt nog eens omgekeken naar de voornaamste bevindingen die vertrekkende van een brede basis in de literatuurstudie werden uitgebouwd in het experimentele onderzoek van enkele specifieke topics. Daaruit blijkt dat een mooie rol is weggelegd voor alcoholhoudende mengsels en ternaire mengsels in het bijzonder om de volgende stap te zetten naar een meer duurzame invulling van het transportgebeuren. Ook waterhoudende alcoholen kunnen een trede zijn in de spreekwoordelijke trap van de omschakeling naar hernieuwbare vloeibare brandstoffen.

Voorts mag het duidelijk wezen dat er voor het verderzetten van dit onderzoek nog een uitgebreid scala bestaat aan tot nog toe onbesproken aspecten van het gedrag van alcoholen en mengsels van alcoholen voor het gebruik in vonkontstekingsmotoren. Met de nieuwe Volvo-proefstand in het vooruitzicht ziet het er dan ook naar uit dat de vakgroep Vervoerstechniek over alle nodige middelen beschikt om binnen dit vakgebied een pioniersrol te blijven vervullen.

### 12.1 Conclusies

In de aanloop naar het experimentele gedeelte van deze master thesis werden enkele interessante onderwerpen bestudeerd waarvan in de literatuur nog substantiële gegevens ontbreken. De conclusies die nu kunnen geformuleerd worden bestaan zowel uit bevestigde verwachtingen als enkele verrassende resultaten. De belangrijkste worden in het hiernavolgende nog eens samengevat.

#### 12.1.1 Waterhoudende ethanol

Gezien het ontbreken van betrouwbare en relevante informatie over de prestaties en emissies van waterhoudende ethanol bij gebruik in vonkontstekingsmotoren was

de keuze voor deze meetset evident. Met de methanol-watermengsels van vorig academiejaar was reeds een nuttige referentie beschikbaar, en bij het vergelijken van de resultaten werden analoge conclusies bekomen:

- De invloed van het toevoegen van water aan ethanol op het effectieve rendement is dermate klein dat voor zo goed als alle waterhoudende mengsels de experimentele fout niet overschreden wordt. Bij laag toerental is er echter wel een penalisatie ten opzichte van pure ethanol door een verlaagde laminaire vlamsnelheid die vanaf gemiddeld toerental wel gecompenseerd wordt door een verhoogde stromingsturbulentie. Opmerkelijk resultaat is dat het extra koel-effect door de hoge latente verdampingswarmte van water bij hoge belasting leidt tot een verhoogd rendement voor de brandstoffen met een beperkte waterconcentratie van 5 à 10 vol%.
- Een verkleinde actieradius is het gevolg van een sterk afgenomen LHV, aangezien het water geen calorische waarde heeft.
- Bij toenemende waterinhoud zal de  $\text{NO}_x$ -emissie ongeveer lineair reduceren met dank aan het koelend effect van het water dat een hoge latente verdampingswarmte en specifieke warmtecapaciteit heeft. Bij hogere percentages water dan 10 vol% moet de ontstekingstiming te veel vervroegd worden wat resulteert in een minder dan lineaire daling van de  $\text{NO}_x$ -vorming.
- De emissie van CO en uitstoot van  $\text{CO}_2$  worden niet significant beïnvloed over het volledige meetbereik. Voor de CO-emissie kan er echter over het algemeen toch een licht verhoogde waarde genoteerd worden die te wijten valt aan de minder volledige verbranding bij toenemende waterconcentratie.

Op basis van deze zaken en de discussie in hoofdstuk 2 kon worden besloten dat ondanks een sterk toegenomen BSFC en dus gereduceerd rijbereik, het voordeel in productiekost de doorslag kan geven bij de keuzestrategie van zowel consument als producent. De trade-off tussen effectief rendement, BSFC en het economische aspect doen vermoeden dat een ideale waterinhoud zich tussen de 5 à 10 vol% situeert. Deze waarde bevindt zich uiterst dicht tegen de azeotrope destillatiegrens en begunstigt dus de aanbeveling om deze laatste dehydratiestap over te slaan. De grenzen qua toegelaten waterpercentage van het “E100” waterhoudende ethanolmengsel dat aangeboden wordt op de Braziliaanse markt zitten vervat in dit resultaat.

### **12.1.2 GEM-mengsels**

De isostoichiometrische ternaire mengsels kunnen zoals gevonden in de literatuur (zie hoofdstuk 4) wel degelijk dienen als drop-in brandstof voor hedendaagse flex-

fuel voertuigen.

Gezien de recente introductie van het GEM-mengselconcept was dit onderzoek het eerste uitgevoerd op een motorproefstand. De voornaamste referentie bestaat dan ook uit de experimenten op de samenstellende componenten van deze mengsels in hoofdstuk 9. Een uitgebreide meetset en bijhorende bespreking in hoofdstuk 10 leiden tot de volgende interessante resultaten:

- De vergelijking met standaardbenzine (Euro 95) leert dat een significante rendementswinst van 1 à 2 %pt kan geboekt worden door gebruik van GEM-mengsels in deellast. Hierbij heeft de invloed van de samenstelling van het isostoichiometrische mengsel zo goed als geen invloed en stijgt het voordeel bij toenemende belasting door een verhoogd koelend effect van de alcoholen.
- Door een lagere LHV van de alcoholen dient ingeboet te worden op het rijbereik gezien de sterk toegenomen BSFC. Interessant resultaat in dit opzicht is dat de GEM-mengsels ondanks eenzelfde effectief rendement als ethanol toch een gunstiger specifiek brandstofverbruik hebben. Met een stijging van 34 tot 40 %pt is het wel duidelijk dat dit een belangrijk nadeel is ten opzichte van benzine.
- Deels tegen de verwachting gecreëerd door de referentiewaarden van Lotus Engineering wordt een significante invloed van de mengselsamenstelling bekomen. Een stijgend benzinegehalte resulteert in een lichte toename van de piektemperaturen in de cilinder wat zorgt voor een verhoogde NO<sub>x</sub>-vorming. Over zo goed als het volledige meetbereik worden echter NO<sub>x</sub>-reducties ten opzichte van benzine gehaald, met uitschieters tot 26%.
- De CO<sub>2</sub>-uitstoot varieert zoals verwacht niet significant in functie van de mengselsamenstelling. Ook hier wordt over het volledige meetbereik een reductie in vergelijking met benzine, met een maximale winst tot 8%.

Niettegenstaande het feit dat de huidige resultaten al voldoende zijn om de aanzet te geven tot een grootschalige integratie van dergelijke mengsels kunnen nog betere prestaties behaald worden door specifiek motorontwerp. Hierbij wordt vooral gedacht aan oplading en verhoogde compressieverhoudingen zoals besproken in hoofdstuk 11. In combinatie met hybridisatie kan agressieve downsizing met toepassing van GEM-blends als brandstof tot zeer hoge well-to-wheel rendementen leiden. Ook directe injectie zal zoals gezien in hoofdstuk 6 een significante verbetering opleveren, wat hopelijk binnenkort kan bevestigd worden op de nieuwe Volvo-proefstand.

Ten slotte leveren deze resultaten het bewijs dat het aandeel hernieuwbare brandstof

in de transportsector met beperkte inspanning kan uitgebreid worden zonder de confrontatie met de biomassalimiet aan te gaan.

## 12.2 Toekomstperspectief

Bij het uitvoeren van het experimenteel gedeelte van deze thesis werden enkele praktische euvels bemerkt die de vlotte voortgang van de metingen bemoeilijkten. Na toelichting van de problemen zal er in deze paragraaf een potentiële oplossing aangeboden worden. Ook worden mogelijke onderzoekspistes voorgesteld die bij toekomstig werk kunnen ingeslagen worden. Hierbij spreekt het voor zich dat het zwaartepunt van het potentieel zich bij de nieuwe Volvo-proefstand situeert.

In afwachting van het volledig operationeel zijn van de nieuwe proefstand kunnen nog heel wat interessante zaken bestudeerd worden op de andere beschikbare proefstanden. Hierbij lijken de meest nuttige zaken te zijn:

- Onderzoek naar alcohol-water-benzinemengsels: hiervoor geldt mogelijk een combinatie van voordelen zoals besproken bij de experimentele hoofdstukken. In de literatuur is hier ook nog zo goed als niets over te vinden [91, 92].
- In deze thesis werd enkel bij stoichiometrische condities en atmosferische werking gemeten, een uitbreiding naar arme werking en oplading is echter zeker ook de moeite waard. Op de Audi-proefstand kan ook nog gekeken worden naar het effect van EGR.
- De Volvo-proefstand biedt ook de mogelijkheid om de invloed van variabele kleppentiming te bestuderen. Hierbij wordt echter een beperkte invloed verwacht van de gebruikte brandstof.

### Volvo proefstand

Zoals ook reeds vermeld doorheen de experimentele resultaten werden enkele praktische problemen geconstateerd:

- De referentiekeuze van de relatieve cilinderdruk ten opzichte van de inlaat is de meest geschikte, maar zorgt gezien de sterke drukvariaties in het inlaatspruitstuk vaak voor grote offsets. Dit is inherent aan de motorwerking met 4 cilinders en met behulp van een matlabscrip (zie DVD) kan dit enigszins verholpen worden. De vraag stelt zich echter of er geen correctere werkwijze bestaat. Voor de nieuwe Volvo-proefstand zal een andere referentie moeten gekozen worden aangezien er met oplading gewerkt wordt.

- Een meer nauwkeurige MAF-sensor is noodzakelijk om een correct volumetrisch rendement te bekomen. Misschien bestaat hier de mogelijkheid om de nieuw aangekochte sensor van de nieuwe Volvo uitwisselbaar te maken tussen de proefstanden. Al dient wel opgemerkt te worden dat deze sensor berekend is op hogere luchtdebieten, waardoor deze werkwijze eventueel meer aangewezen is met een van de sensoren van de andere proefstanden.
- Een ander voordeel van een correcte MAF-sensor is dat een betrouwbare controle kan uitgevoerd worden op de luchtfactor. Dit bleek gedurende deze thesis ook noodzakelijk gezien enkele afwijkende emissieresultaten een incorrecte werking van de lambdasensor suggereerden (bv. bij werking op ethanol).

### **Audi proefstand**

Deze opstelling bevat nog steeds de meeste instellingsmogelijkheden: zowel mechanische oplading, EGR als afwijkingen van stoichiometrische werking behoren tot de opties.

Na het verhogen van de compressieverhouding naar  $CR = 13 : 1$  die vorig academiejaar werd toegepast gedraagt de opstelling zich echter relatief instabiel bij een groot deel van het motorbereik. Dit vertaalt zich in de praktijk in een moeilijk beoordeelbare koppeluitlezing, wat instellen van MBT-timing onmogelijk maakt. Hiervoor kan men eventueel uitwijken naar alternatieve methodes om de optimale ontstekings timing te kunnen bepalen of eerder werken met variatie van instelparameters (TP, injectieduur,...) in plaats van koppelvariatie.

### **Nieuwe Volvo proefstand**

Naast het assisteren bij het volledig functioneel krijgen van deze proefstand zal de bijdrage van de thesisstudenten volgend jaar hopelijk ook bestaan uit het uitvoeren van een eerste reeks metingen. Hier zal het interessant zijn om te zien in welke mate de prestatievoordelen besproken in hoofdstuk 6 kunnen verzilverd worden. Ook de oplading op deze viercilinder motor zal hopelijk leiden tot mooie resultaten.

### **Volkswagen proefstand**

In afwachting van het operationeel zijn van de nieuwe Volvo-proefstand kunnen eventueel al experimenten uitgevoerd worden op de VW-proefstand aan de Karel de Grote-hogeschool. Deze opgeladen motor met een compressieverhouding van 19.5:1 biedt vele mogelijkheden om de gunstige eigenschappen van de alcoholen nog verder te benutten.

### **On-board waterstofgeneratie**



Het in hoofdstuk 3 aangebrachte concept van on-board waterstofgeneratie biedt ook mogelijkheden om experimenteel werk op te verrichten. Hierbij zal moeten gekeken worden of of de sturing van de proefstanden die geschikt zijn voor gasvormige brandstoffen toelaat om gelijktijdig het syngas en de vloeibare brandstof in te spuiten. Een andere optie is het aankopen van een prototype convertor waarbij het gas dan eventueel in de brandstof kan bijgemengd worden. Nog een andere optie is om bij lage belastingen puur op syngas te werken en bij deze werkingspunten de vergelijking te gaan maken qua prestaties en emissies ten opzichte van de vloeibare brandstoffen.

### **Butanol**

In hoofdstuk 4 van de literatuurstudie werd butanol vergeleken met methanol en ethanol. De conclusie luidde dat elk van deze alcoholen verschillende voor- en nadelen hadden en dat er geen uitgesproken winnaar was. Het potentieel van de 2 lichtste alcoholen werd reeds onderzocht aan deze vakgroep en zoals in vorige paragrafen besproken, zijn er nog talrijke onderzoeksonderwerpen mogelijk hieromtrent. Hoewel butanol op een hernieuwbare wijze kan geproduceerd worden en kan gebruikt worden als een *drop-in fuel* door o.a. zijn hoge LHV-waarde, werd deze brandstof echter nog nooit onderworpen aan experimenten gedurende de voorbije jaren. Een mogelijke optie hierbij is het onderzoek naar het potentieel van butanol om bij te dragen aan het huidige aanbod aan alcohol/benzinemengsels.

### **Praktisch**

Tijdens het uitvoeren van de experimenten werden enkele complicaties ervaren. Volgende aanbevelingen kunnen helpen om de metingen nog vlotter te uit te voeren:

- Door de beperkte hoeveelheid ethanol konden enkele gewenste meetsets niet in hun volledigheid worden uitgevoerd. Vooral de mogelijkheid tot testen van een belasting hoger dan 80 Nm bij een betekenisvol aantal mengsels en toeren-tallen werd hierdoor aan banden gelegd. Een mogelijke optie om het volume ethanol te verhogen is om de pure ethanol bij aankoop te denatureren met 1% benzine zodat geen taksen dienen betaald te worden. Voor het aanmaken van de gewenste mengsels dient hier dan wel rekening mee gehouden te worden.
- Om een grote hoeveelheid mengsel in dezelfde samenstelling te bekomen werd gebruik gemaakt van jerrycans van 20 L. Met alle verschillende soorten mengsels kwamen we soms jerrycans te kort waardoor sommige restjes moesten weggegoten worden. Deze restjes kunnen nuttig zijn om nadien eventueel herhalingsmetingen te doen. De aankoop van een aantal extra jerrycans lijkt ons dan ook zeer nuttig naar de toekomst toe.

- Voor deze werkwijze wordt gebruik gemaakt van een grote nauwkeurige weegschaal van het type Mettler Toledo ICS429 waardoor zeer tijdsefficiënt grote meetsets konden worden uitgevoerd. Deze weegschaal moest echter wel gedeeld worden wat soms tot conflicten leidde, idealiter zou nog een dergelijke weegschaal moeten aangekocht worden. Deze is echter nogal kostelijk.
- Aangezien de densiteit van alcohol-benzinemengsels niet of toch moeilijk berekend kan worden uit de eigenschappen van de componenten is het interessant om densiteitsmetingen te kunnen uitvoeren. De schaal van de beschikbare densiteitsmeter is echter net niet geschikt voor de mengsels van alcoholen met benzine ( $< 0.775\text{kg/l}$ ). De aankoopprijs hiervan is niet zo hoog en het zou handig zijn als er een exemplaar geschikt voor dergelijke mengsels aangeschaft wordt.
- Wanneer er zich een grote hoeveelheid lucht in de leidingen van de methanolkast bevindt, kan het soms problematisch zijn om deze weer op druk te brengen. Er kan redelijk wat tijd bespaard worden door een handpompje in de brandstofleiding tussen tank en pomp te installeren zodat de leiding rap met brandstof gevuld kan worden. Dergelijke pompjes bestaan over het algemeen uit rubber en er dient aandacht aan besteed te worden dat de corrosieve alcoholen dit materiaal niet aantasten.

**Deel III**

**Bijlagen**

## Bijlage A

# Technologische voordelen voor alcoholen

In eerste ontwikkelingen van DI-systemen was de technologie nog beperkt tot afgeleiden van dieseltechnologie (niet voorzien voor hoge toerentallen), resulterend in lage specifieke vermogenoutput en hoge HC emissies bij lage lasten. Wel werden snel ook enkele interessante voordelen ontdekt, zoals het vermijden van poortbesproeiing en bijhorende nadelen als nadruppelen. Dit levert een verbeterde BSFC en een verlaagde uitstoot op in vergelijking met een motor met PFI. Er kan zelfs een drastische vermindering van HC emissies worden gerealiseerd bij koude start, aangezien deze bij PFI-motoren voor 90 % kunnen toegewezen worden aan het bevochtigen van de poort bij opstarten [93]. Dit is uiteraard een zeer groot voordeel voor toepassing van alcoholen, aangezien de HC emissies hiervan bij koude start algemeen gezien een pijnpunt zijn in vergelijking met benzine.

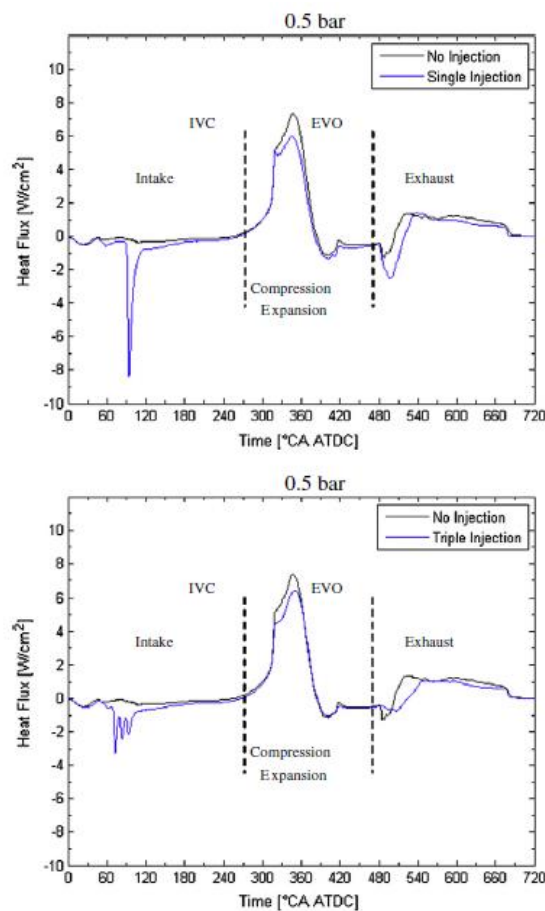
Het is duidelijk dat werking met PFI enkele inherente nadelen met zich meebrengt die verdere rendementsverbeteringen in de weg staan. Deze zijn vooral het resultaat van de brandstoffilm door wandbesproeiing in de poort en de ladingsverliezen door de gasklep, terwijl het ladingskoeffect ook onmiskenbaar in het voordeel van DI spreekt. Toch heeft het traditioneel gebruikte PFI-systeem enkele conceptuele pluspunten, waarvan de mengselbereidingstijd, geen slijtage door zuiger- en cilinderwandbesproeiing en hogere uitlaattemperaturen voor katalytische uitlaatgasbehandeling de voornaamste zijn. Ook het controleren van het DI-systeem, relatief hogere PM emissies en technologische euvelds zoals afzettingen op de injector zijn drempels die bij het overschakelen moeten overwonnen worden. Deze investeringen kunnen echter de moeite waard worden wanneer de voordelen van de directe injectie gecombineerd worden met die van alcoholen of mengsels van alcoholen.

## **A.1 Sprayvorming, injector- en verbrandingskamerdesign**

Het spreekt voor zich dat de injectoren de belangrijkste functie vervullen van het systeem en dus ook de meest kritieke component zijn. De sprayvorming is van belang voor een goede verneveling van de brandstof zodat deze op tijd kan verdampen. Hiervoor wordt de brandstof op een druk tussen de 4 en 13 MPa gebracht, waarbij de afweging wordt gemaakt tussen de voordelen (atomisatie van de brandstofspray, spraypenetratie) en nadelen (hoger geluidsniveau en pomplevensverwachting) van een verhoogde druk. Drukken boven de 8,5 MPa worden indien mogelijk vermeden wegens te hoge nadelige effecten inzake injectorlawaai.

Om het mengselvormingsproces te optimaliseren dient uitvoerige aandacht besteed te worden aan de interactie van de brandstofspray met de lucht, cilinderwand en zuiger. Net zoals bij dieselinjectoren zijn de belangrijkste parameters de sprayhoek en -penetratie. Hierbij heeft de sprayhoek een groot belang voor het luchtgebruik bij gestratificeerde mengsels (late injectie). De penetratie van de spray bepaalt de mogelijkheid tot ladingskoeling voor homogene mengsels (vroeg injectie), waarbij wandbesproeiing zoveel mogelijk vermeden wordt.

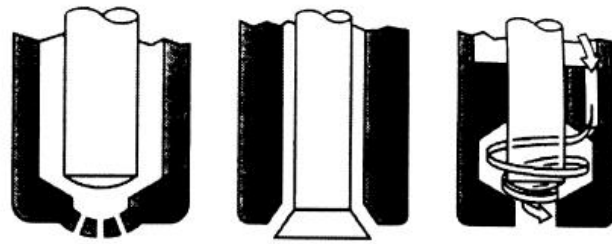
Serras-Pereira et al. [94] onderzochten met behulp van optische technieken en warmtefluxmetingen het effect van wandbevochtigende sprays met benzine, iso-octaan, butanol, ethanol en een E10-mengsel in DISI-motoren bij 3 verschillende motortemperaturen (20, 50 en 90 °C). Deze metingen werden uitgevoerd op een optisch toegankelijke watergekoelde één-cilindermotor op een constant toerental van 1500 tpm. Hierbij werd de zuigerkop doorzichtig uitgevoerd en werden in de cilindermantel snelle warmtefluxsensoren aangebracht op een ring verplaatsbaar over zowat de ganse cilinderlengte. Een drievoudige injectie (zie sectie A.2) blijkt een goede strategie om de impuls van de spray te beperken en zodoende de penetratie en bevochtiging te verminderen. Dit effect is duidelijk te zien op figuur A.1 aan de hand van de sterk verminderde negatieve warmteflux in de inlaatslag rond 80 10 °ca. Ook werd met deze techniek een snellere verdamping en gedeeltelijke ontkoppeling van de interactie met de inlaatluchtstroming bekomen. Er wordt geconstateerd dat de wandbevochtiging sterk afhankelijk is van de belasting van de motor, aangezien bij WOT de sterke inlaatstroming de spray afbuigt en vermijdt dat deze de cilinderwand treft. Wat betreft de invloeden van de verschillende brandstoffen wordt opgemerkt dat bij lage motortemperaturen de wandbevochtigende ethanol niet volledig verdampt is terwijl dit voor benzine, iso-octaan en E10 wel het geval was. Butanol behoudt zelfs bij hogere motortemperatuur een vloeistoffilm op de cilinderwand door zijn specifieke sprayvorming en hoge latente verdampingswarmte, zie ook hoofdstuk 4 over de eigenschappen van lichte alcoholen.



Figuur A.1: Invloed injectiestrategie op wandbevochtiging [94]

Verder wordt van de injectoren verwacht dat ze een zo nauwkeurig mogelijke hoeveelheid brandstof injecteren zonder druppelen of lekken en met zo weinig mogelijk naaldschommelingen. In combinatie met het verbrandingskamerontwerp wordt gestreefd naar een zo efficiënt mogelijke mengselvorming. Hoewel reeds meerdere jaren aan dergelijke systemen gewerkt werd voor dieselmotoren is deze technologie niet rechtstreeks toepasbaar op GDI gezien de sterk verschillende brandstofeigenschappen en lagere brandstofdruk. Nieuw ontwikkelde configuraties zijn nodig voor optimale werking en CFD is het voornaamste werkmiddel om dit te realiseren. De voornaamste concepten voor injectordesign worden met hun voor- en nadelen weergegeven in figuur A.2.

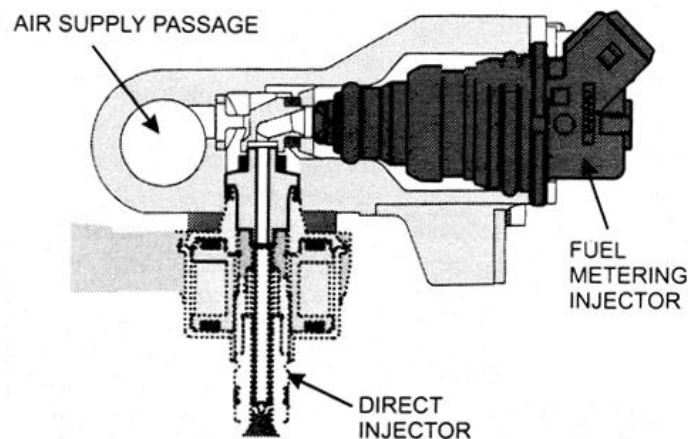
Een ander concept om een zo hoog mogelijke atomisatie ( $SMD = Sauter\ Mean\ Diameter$ , kleiner dan 15-20 micrometer) van de spray te bekomen is om een luchtgeassisteerde injector te gebruiken. Voor dit concept verhoogt de complexiteit van het systeem wel aanzienlijk door de benodigde extra solenoïde en luchtcompressor. Een voorbeeld wordt gegeven in figuur A.3. Deze injectoren worden vooral gebruikt



Criteria	Multi hole concept	Outward opening concept	Inward opening concept
Flexibility of spray pattern	++	+	+
Potential for inclined spray axis	+	-	++
Atomization quality at system pressure = 10 MPa	-	0	++
Robustness against fouling	-	++	+

Figuur A.2: Voor en nadelen van drie verschillende injectorconcepten [65]

in tweetakt- en PFI-motoren maar zijn even goed bruikbaar voor viertaktmotoren met directe injectie. Door gebruik van twee vloeistoffen (lucht en brandstof) kan door de holle spraystructuur bij een lagere brandstofdruk een hogere verneveling bekomen worden.



Figuur A.3: Principe luchtgeassisteerde injector [65]

Om een correcte verneveling van de brandstofspray te verzekeren wordt voornamelijk gebruik gemaakt van hoge druk swirlinjectoren. Hierbij zorgt de swirl ervoor dat de brandstofdeeltjes een voldoende snelheid hebben bij binnenkomen van de cilinder

met een kleinere kans op bevochtigen van wand en zuiger. Zhao et al. [65] maakten een uitgebreide samenvatting van de literatuur beschikbaar hieromtrent in het jaar 1999. Conclusie is dat er in verder onderzoek moet gewerkt worden aan het bereiken van een zo hoog mogelijke atomisatie bij beperkte drukken zodat geluidsniveau en slijtage beperkt blijven.

De stroming van het lucht/brandstof-mengsel binnen de cilinder kan pas volledig gecontroleerd worden als het totale verbrandingskamerconcept op elkaar afgestemd is. Dit betreft dus specifiek de plaatsing en uitvoering van de injectoren, vonkelektrode, in- en uitlaatkleppen en de vorm van de zuigerkop.

Een goed begrip van de stroming binnen de verbrandingskamer is nodig om gestratificeerde verbranding te bewerkstelligen en het brandbare mengsel aan de bougie te krijgen. Een volledige bespreking van optimaal ontwerp van dergelijke verbrandingskamers zou ons echter te ver leiden voor wat betreft deze thesis. Enkele praktische uitvoeringen worden besproken in [65].

Een andere uitdaging is de minimalisatie van afzettingen op de injectortip. Gezien de lagere werkingsdrukken bij GDI-motoren (4 - 13 MPa) in vergelijking met dieselmotoren (50 - 140 MPa) is er meer risico op niet-aflatende vorming van koolstofresidu's op de injectortip. Interne afzettingen kunnen een verlaagde injectiehoeveelheid teweeg brengen, terwijl externe vervuiling voornamelijk een afwijkende sprayrichting tot gevolg heeft. De voornaamste parameters die dergelijke injectorbevuiling beïnvloeden zijn de injectortiptemperatuur, het brandstofdebiet, de brandstoftemperatuur en de brandstofsamenstelling (met sterke invloed van zwavelconcentratie). Mogelijke oplossingen voor een levensduurverlenging zijn een goede plaatsing van de injectoren (niet te diep in de cilinder, dicht bij inlaatkleppen en ver van uitlaatkleppen), brandstofadditieven en coatings op de injector die afzettingen vertragen of elimineren. GDI-motoren zijn over het algemeen een stuk sensitiever aan injectorbevuiling en dit effect heeft een grote invloed op emissies, brandstofverbruik en algemeen rijgedrag van het voertuig [95]. Gezien de lagere zwavelinhoud en voordelige koeleigenschappen van alcoholen en mengsels van alcoholen is het aannemelijk dat deze brandstoffen de injectortiplevensduur gunstig zullen beïnvloeden.

De geometrieën en ontwerpen voor PFI-motoren hebben reeds een quasi-optimale status bereikt na jaren van ontwikkeling. Dit is nu ook aan het gebeuren voor DI-motoren, waarna de introductie in de standaardvoertuigen gestaag zal verlopen zoals het PFI-systeem destijds ook de carburator vervangen heeft.



## A.2 Injectiestrategie

Tweetrapsinjectie (TSDI - *Two Stage Direct Injection*) wordt vaak voorgesteld als middel om een bepaalde regeling te bekomen zonder drastischere maatregelen zoals bijvoorbeeld het smoren van de gasklep. Met deze dieselanaloge technologie kan een verbetering bekomen worden van de overgang tussen deel- en vollast, het koppel (klopbeperking door injectie in zowel inlaat- als compressieslag) of opwarmtijd van de katalysator bij koude start (verhogen van uitlaattemperatuur door injectie in de expansieslag). Fan en Li [96] werkten op dit laatste idee met behulp van een TSDI en concludeerden dat door toepassen van een uitgebreide tweede injectie een significante daling van HC emissies kan gerealiseerd worden tijdens koude start. De optimale ontstekingstiming voor minimale HC emissies wordt vastgelegd op  $10^\circ\text{kh}$  BTDC. Door regeling van de eerste injectie zodat een totale stoichiometrische AFR van 26.7 bereikt wordt rapporteren ze een daling van NO emissies. Gezien de HC emissies bij alcoholgevoede motoren nog steeds als problematisch beschouwd worden kan deze techniek uiterst nuttig zijn.

Het concept van TSDI is niet alleen interessant voor koude start, maar ook voor regeling bij variabele last en toerental. Met behulp van meerdere injecties kan een fijnere afregeling bekomen worden. Dit was het doel van Costa et al. [16] die dit numeriek modelleerden voor gemiddelde last en gemiddeld toerental. Het resultaat van hun 3D model belooft een hogere verbrandingsefficiëntie en bijgevolg hogere arbeid per cyclus voor een optimale tweestapstiming. De HC emissies worden ook verbeterd, terwijl de NO emissies lijden onder de verhoogde temperaturen door vollediger verbranding. Wel dient de kanttekening gemaakt te worden dat in dit onderzoek de twee brandstofpulsens uitsluitend 50/50 verdeeld waren en er enkel geregeld werd op de timing tussen deze twee pulsens. Wanneer zoals bij Fan en Li [96] een regeling wordt voorzien op de eerste injectie kan dit euvel eventueel teniet gedaan worden.

Voor het overgaan van het ene werkingsgebied naar een armere of rijkere mode dient er aandacht besteed te worden aan de mengselvorming tijdens deze transitie. Extreem arme of rijke mengsels zijn uit den boze aangezien deze voor misfirings kunnen zorgen en bijgevolg de winsten die de regeling met zich meebrengt volledig teniet kunnen doen. Om de gebruikerservaring van de motor niet in het gedrang te brengen zijn koppelfluctuaties ook niet toegestaan, dit maakt de regeling van het systeem er niet gemakkelijker op.

Een iets verregeandere injectiestrategie wordt onderzocht door Daniel et al. [97]. Zij werkten aan een combinatie van PFI en DI genaamd dual-injection, specifiek voor mengsels van 2,5-dimethylfuraan (DMF) met benzine. Door vergevorderde

brandstofmengselvorming in de cilinder wordt (bij laag toerental, 1500 tpm) nog eens winst gemaakt in thermisch rendement en brandstofverbruik ten opzichte van DI of PFI motoren apart. Dit concept is potentieel ook zeer interessant voor mengsels met andere alcoholen of zelfs ternaire mengsels maar verhoogt de complexiteit van het injectiesysteem aanzienlijk.

Veel onderzoek werd reeds verricht naar dergelijke controlestrategieën [65] en de conclusie is telkens dat er significante verbeteringen kunnen gerealiseerd worden mits een sterke verhoging van de complexiteit van de regeling en componenten. In hoofdstuk 5 was een tweetrapssysteem zelfs een essentieel onderdeel bij gebruik als virtuele drukmeetsensor.

## Bijlage B

# Berekening eigenschappen van ternaire mengsels

In deze bijlage zal aangetoond worden hoe men enkele fysische eigenschappen kan berekenen van de ternaire GEM-mengsels, startend van de basisproducten methanol, ethanol en benzine.

### B.1 Berekening AFR, LHV en LV

Om een juiste vergelijking te maken tussen de verschillende mengsels moet men er voor zorgen dat men de fysische eigenschappen op een goede manier gaat berekenen. Hoewel de mengsels vaak worden voorgesteld met volumeprocenten, moet men voor de bepaling van mengseleigenschappen een correcte weging gaan toepassen op basis van massa- en molpercentages. Ook bij de volumeprocentages moet men de nodige aandacht besteden aan het feit dat het totaal volume van het mengsel niet altijd overeenkomt met de som van de volumes van de bestanddelen afzonderlijk. Een E85-mengsel is dus opgebouwd uit 15 vol% benzine en 85 vol% ethanol afzonderlijk gemeten en dan pas samengemengd.

Om van de volumeprocenten om te schakelen naar massa- of molpercentages gebruikt men de volgende formules:

$$m\%_x = \frac{vol\%_x \cdot \rho_{vloeibaar,x}}{\sum_i vol\%_i \cdot \rho_{vloeibaar,i}}$$
$$mol\%_x = \frac{\frac{vol\%_x \cdot \rho_{vloeibaar,x}}{MM_x}}{\sum_i \frac{vol\%_i \cdot \rho_{vloeibaar,i}}{MM_i}}$$

De weging volgens massa- of molpercentages is afhankelijk van de desbetreffende eigenschap. Hierna volgen enkele eigenschappen die gerefereerd zijn per kilogram

brandstof en dus via massapercentages worden bepaald. De stoichiometrische lucht-verhouding ( $L_s$ ), de onderste verbrandingswaarde (LHV) en de latente verdampings-warmte ( $\Delta h_{fg}$ ) kunnen als volgt berekend worden:

$$L_{s,\text{mengsel}} = m\%_{\text{benzine}} \cdot L_{s,\text{benzine}} + m\%_{\text{methanol}} \cdot L_{s,\text{methanol}} + m\%_{\text{ethanol}} \cdot L_{s,\text{ethanol}}$$

$$LHV_{\text{mengsel}} = m\%_{\text{benzine}} \cdot LHV_{\text{benzine}} + m\%_{\text{methanol}} \cdot LHV_{\text{methanol}} + m\%_{\text{ethanol}} \cdot LHV_{\text{ethanol}}$$

$$\Delta h_{fg,\text{mengsel}} = m\%_{\text{benzine}} \cdot \Delta h_{fg,\text{benzine}} + m\%_{\text{methanol}} \cdot \Delta h_{fg,\text{methanol}} + m\%_{\text{ethanol}} \cdot \Delta h_{fg,\text{ethanol}}$$

Andere eigenschappen zijn helaas niet zo simpel te berekenen vanuit de afzonderlijke componenten. Zo kunnen eigenschappen als volatiliteit, destillatie curve, octaangetal, enz. enkel op een kwalitatieve wijze worden voorspeld. Deze worden dan vergeleken op basis van testresultaten.

## B.2 Vlamsnelheden

De laminaire vlamsnelheid van een brandstof(mengsel) is een zeer belangrijke parameter om o.a. het effectieve rendement te gaan voorspellen voor bijvoorbeeld de ternaire GEM-mengsels in hoofdstuk 10. Volgens Sileghem et al. [98] wordt deze eigenschap echter niet goed voorspeld op basis van mol-, massa- of volumefractie van de componenten. Zij stelden vast dat de mengregels met 'energy fraction' en die van 'Hirasawa et al.' en 'Le Chatelier' de beste resultaten vertoonden. Voor een diepgaandere discussie hieromtrent verwijzen we naar de betreffende paper. Voor deze thesis is uiteindelijk gekozen voor de eenvoudig toepasbare 'energy fraction mixing rule':

$$u_{\text{lam},\text{mengsel}} = \sum_i \alpha_i \cdot u_{\text{lam},i}$$

In deze uitdrukking is  $\alpha_x$  de energie fractie van de component  $i$ . Deze fractie kan berekend worden als volgt:

$$\alpha_i = \frac{\Delta cH_i^o \cdot x_i}{\sum_i \Delta cH_i^o \cdot x_i}$$

Waarbij  $\Delta cH_i^o$  de verbrandingswarmte is en  $x_i$  de molaire fractie van de component  $i$  in het mengsel.

## Bijlage C

# Berekende grootheden en foutenanalyse

In dit hoofdstuk worden de verschillende berekende grootheden, die gebruikt worden in de voorgaande hoofdstukken, uitgewerkt. De uitwerking is voornamelijk geïnspireerd op vorige thesissen [4, 5, 3]. Aangezien de gemeten grootheden afwijkingen met de werkelijkheid vertonen, bevatten de berekende grootheden ook een bepaalde fout. Deze fout kan worden begroot aan de hand van de formule van Taylor die de fout op een willekeurige functie  $q = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  definieert als:

$$\delta q = \sqrt{\left(\frac{\partial q}{\partial x_1} \cdot \delta x_1\right)^2 + \left(\frac{\partial q}{\partial x_2} \cdot \delta x_2\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial q}{\partial x_n} \cdot \delta x_n\right)^2}$$

De proefstanden waarop de metingen zijn gebeurd, maken gebruik van verschillende meet-apparatuur. Daarom zal de foutenanalyse opgesplitst worden naargelang de opstelling.

### C.1 Grootheden en fouten

Met  $M_e$  het effectieve koppel [ $Nm$ ],  $n$  het toerental [ $rpm$ ],  $B$  het brandstofverbruik [ $kg/h$ ],  $V_s$  de totale cilinderinhoud [ $m^3$ ] en  $H_u$  de onderste verbrandingswaarde [ $kJ/kg$ ] definiëren we de grootheden als:

#### C.1.1 Effectief vermogen

$$P_e = 2 \cdot \pi \cdot \frac{M_e}{1000} \cdot \frac{n}{60} \quad [kW]$$
$$\delta P_e = \frac{1}{30000} \sqrt{\pi^2 n^2 \delta M_e^2 + \pi^2 M_e^2 \delta n^2} \quad [kW]$$

Waarbij:

- voor de Volvo-proefstand:  $\delta n = 5 \text{ rpm}$  en  $\delta M_e = 0.6 \text{ N/m}$  [4],
- voor de Audi-proefstand:  $\delta n = 5 \text{ rpm}$  en  $\delta M_e = 0.6 \text{ N/m}$  [4],

### C.1.2 Gemiddelde effectieve druk (BMEP)

$$BMEP = \frac{P_e}{V_s \cdot n / 60 \cdot \chi \cdot 100} \quad [\text{bar}]$$

$$\delta BMEP = \frac{6}{5} \sqrt{\frac{\delta P_e^2}{V_s^2 n^2} + \frac{P_e^2 \delta n^2}{V_s^2 n^4}} \quad [\text{bar}]$$

### C.1.3 Specifiek brandstofverbruik (BSFC)

$$BSFC = \frac{B}{P_e} \cdot 1000 \quad \left[ \frac{g}{kWh} \right]$$

$$\delta BSFC = 1000 \cdot \sqrt{\frac{B^2 \cdot \delta P_e^2}{P_e^4} + \frac{\delta B^2}{P_e^2}} \quad \left[ \frac{g}{kWh} \right]$$

waarbij:

- voor de Volvo- en Audi-proefstanden:

$$B = \frac{m_{voor} - m_{na}}{t_{voor} - t_{na}} \quad \left[ \frac{kg}{h} \right]$$

$$\delta B = \sqrt{2 \frac{\delta m^2}{(t_{voor} - t_{na})^2} + 2 \frac{(m_{voor} - m_{na})^2 \delta t^2}{(t_{voor} - t_{na})^4}} \quad \left[ \frac{kg}{h} \right]$$

Hierbij is:

- voor metingen op benzine en methanol:

$$\delta m = 0.001 \text{ kg (Mettler-Toledo balans)}$$

$$\delta t = 0.1 \text{ s}$$

### C.1.4 Effectief rendement

$$\eta_e = \frac{P_e \cdot 3600}{B \cdot H_u} \quad [\%]$$

$$\delta \eta_e = 3600 \cdot \sqrt{\frac{\delta P_e^2}{B^2 \cdot H_u^2} + \frac{P_e^2 \cdot \delta B^2}{H_u^2 \cdot B^4}} \quad [\%]$$

### C.1.5 Geïndiceerd rendement

$$\eta_i = \frac{W_i \cdot n \cdot 3600}{60 \cdot 2 \cdot B \cdot 1000 \cdot H_u} \quad [\%]$$

$$\delta\eta_i = 0.03 \cdot \sqrt{\frac{W_i^2 \cdot \delta n^2}{B^2 \cdot H_u^2} + \frac{W_i^2 \cdot n^2 \cdot \delta B^2}{H_u^2 \cdot B^4}} \quad [\%]$$

Hierbij is de fout op de geïndiceerde arbeid verwaarloosd.

### C.1.6 Mechanisch rendement

$$\eta_m = \frac{P_e}{P_i} \quad [\%]$$

$$\delta\eta_m = 3600 \cdot \sqrt{\frac{\delta P_e^2}{B^2 \cdot H_u^2} + \frac{P_e^2 \cdot \delta B^2}{H_u^2 \cdot B^4}} \quad [\%]$$

Hierbij is de fout op het geïndiceerde vermogen verwaarloosd.

### C.1.7 Leveringsgraad

$$\lambda_l = \frac{\dot{m}_{\text{werkelijk}}}{\dot{m}_{\text{theoretisch}}} = \frac{\dot{m}_{\text{lucht}} + \dot{m}_{\text{brandstof}}}{m_{\text{theoretisch}} \cdot n \cdot \chi}$$

$$\delta\lambda_l = \frac{1}{m_{\text{theoretisch}} \cdot n \cdot 60 \cdot \chi} \cdot \sqrt{\delta\dot{m}_{\text{lucht}}^2 + \delta\dot{m}_{\text{brandstof}}^2 + (\dot{m}_{\text{lucht}} + \dot{m}_{\text{brandstof}})^2 \cdot \frac{1}{n^2} \cdot \delta n^2}$$

met  $\chi = 1/2$  voor viertaktmotoren en  $\delta\dot{m}_{\text{brandstof}} = \delta B$ ;  $\dot{m}_{\text{lucht}}$  en  $\dot{m}_{\text{brandstof}}$  worden gemeten;  $m_{\text{theoretisch}}$  wordt berekend zoals uitgelegd in [4].

En verder:

- voor de Volvo-proefstand: MAF-sensor:

$$\delta\dot{m}_{\text{lucht}} = 0.03 \cdot \dot{m}_{\text{lucht}} \quad [4]$$

- voor de Audi-proefstand: Bronkhorst Hi-tech F-106BZ-HD-01-V:

$$\delta\dot{m}_{\text{lucht}} = 0.6 \text{ N/m}^3 \text{ h} = 0.2 \text{ g/s} \quad [4]$$

## C.2 Emissiemetingen

### C.2.1 Foutenanalyse

De Volvo- en de Audi-proefstanden maken beide gebruik van de uitlaatgasanalysekast in het labo. De apparaten in die kast met hun bijhorende fout zijn hieronder opgelijst.

- Maihak Oxor-P S710:

$$\delta O_2 = 0.25 \text{ vol\%}$$

- Signal Hydrocarbon Analyser Model 3001:

$$\delta HC = 1\% \cdot FS$$

met  $FS = Full Scale = 1000 \text{ ppm}$

- Maihak Multor 610:

$$\delta CO = 1.5\% \cdot FS + 1\% \cdot MV$$

met  $FS = 12 \text{ vol\%}$  en  $MV = Measured Value$

- Maihak Multor 610:

$$\delta CO_2 = 1.5\% \cdot FS + 1\% \cdot MV$$

met  $FS = 15 \text{ vol\%}$

- Maihak Multor 610:

$$\delta NO_x = 1.5\% \cdot FS + 1\% \cdot MV$$

met  $FS = 5000 \text{ ppm}$

### C.2.2 Omrekening naar specifieke emissie [g/ekWh]

Om de gemeten emissies van de verschillende studies op een betrouwbare basis met elkaar te kunnen vergelijken, moeten zij worden omgerekend naar specifieke emissies. Om deze emissies te bepalen heeft men de emissiewaarden nodig gemeten in de natte rookgassen. De analysetoestellen meten evenwel de emissies in droge rookgassen. Daarom moet op de gemeten emissiewaarden een correctie worden toegepast:



- Voor  $CO_2$ ,  $CO$  en  $HC$  [4]:

$$conc_{nat} = k_w \cdot conc_{droog} \quad [vol\%]$$

$$\delta conc_{nat} = \sqrt{\delta k_w^2 \cdot conc_{droog}^2 + k_w^2 \cdot \delta conc_{droog}^2} \quad [vol\%]$$

met:

$$k_w = \frac{1}{1 + \alpha \cdot 0.005 \cdot (vol\%_{CO_{droog}} + vol\%_{CO_2, droog}) + k_{w2}}$$

$$k_{w2} = \frac{1.608 \cdot y_{H_2O}}{1000 + (1.608 \cdot y_{H_2O})}$$

$$y_{H_2O} = 0.622 \cdot \frac{\phi \cdot p_s}{p_{lucht} - \phi \cdot p_s}$$

$$\delta k_w = 0.005 \cdot \alpha \cdot \sqrt{\frac{\delta vol\%_{CO_{droog}}^2 + \delta vol\%_{CO_2, droog}^2}{(1 + \alpha \cdot 0.005 \cdot (vol\%_{CO_{droog}} + vol\%_{CO_2, droog}) + k_{w2})^4}}$$

Hierbij werd de fout op  $y_{H_2O}$  verwaarloosd en zijn:

- $\alpha$  = de verhouding van waterstof tot koolstof
- $y_{H_2O}$  = de absolute vochtigheid van de inlaatlucht [g water/kg lucht]
- $\phi$  = de relatieve vochtigheid van de inlaatlucht
- $p_s$  = de saturatiedruk van de inlaatlucht [kPa]

- Voor  $NO_x$  [4]:

$$NO_{x,nat} = K_h \cdot NO_{x,droog} \quad [ppm]$$

$$\delta NO_{x,nat} = K_h \cdot \delta NO_{x,droog} \quad [ppm]$$

met:

$$K_h = 0.6272 + 44.030 \cdot 10^{-3} \cdot y_{H_2O} - 0.862 \cdot 10^{-3} \cdot y_{H_2O}^2$$

Wanneer alle emissiewaarden van de natte rookgassen zijn berekend, kan het massadebiet van elke component  $x$  worden bepaald aan de hand van:

$$\dot{m}_x = \frac{MW_x}{MW_{brandstof}} \cdot \frac{vol\%_x \cdot B \cdot 1000}{(vol\%_{CO_2,nat} - vol\%_{CO_2,lucht}) + vol\%_{CO_{nat}} + vol\%_{HC_{nat}}} \quad [g/h]$$

Daarbij is:

- $MW_{brandstof} = 12.0107 + \alpha \cdot 1.00794 + \beta \cdot 15.9994 \quad [g/mol]$
- $\beta = \text{deverhouding zuurstof tot koolstof}$
- $B = \text{brandstofverbruik in kg/h}$
- $1 \text{ ppm} = \frac{1 \text{ gas/volume}}{10^6 \text{ air/volumes}}$

De specifieke emissie wordt vervolgens verkregen door het massadebiet te delen door het vermogen aan de krukas,  $P_e$ . De overeenkomstige fout hierop wordt dan gegeven door:

$$\begin{aligned} \delta \dot{m}_x = 1000 \cdot \frac{MW_x}{MW_{brandstof}} \cdot & \left[ \sqrt{\frac{\delta vol\%_x^2 \cdot B^2 + vol\%_x^2 \cdot \delta B^2}{((vol\%_{CO_2,nat} - vol\%_{CO_2,lucht}) + vol\%_{CO_{nat}} + vol\%_{HC_{nat}}) \cdot P_e)^2}} \right. \\ & + \sqrt{\frac{vol\%_x^2 \cdot B^2 \cdot (\delta vol\%_{CO_2,nat}^2 + \delta vol\%_{CO_{nat}}^2 + \delta vol\%_{HC_{nat}}^2)}{((vol\%_{CO_2,nat} - vol\%_{CO_2,lucht}) + vol\%_{CO_{nat}} + vol\%_{HC_{nat}})^4 \cdot P_e^2}} \\ & \left. + \sqrt{\frac{vol\%_x^2 \cdot B^2 \cdot \delta P_e^2}{((vol\%_{CO_2,nat} - vol\%_{CO_2,lucht}) + vol\%_{CO_{nat}} + vol\%_{HC_{nat}})^2 \cdot P_e^4}} \right] \quad [g/kWh] \end{aligned}$$

### C.3 Coefficient of Variation

De opeenvolgende motorcycli vertonen een bepaalde spreiding. De cyclusvariatiecoëfficiënt ('*Coefficient of Variation, CoV*') is een maat voor deze spreiding en kan worden gedefinieerd als de verhouding van de standaardafwijking van de gemiddelde geïndiceerde effectieve druk ('*indicated mean effective pressure, IMEP*') tot de gemiddelde IMEP.

$$CoV = \frac{\sigma_{IMEP}}{\mu_{IMEP}}$$

## Bijlage D

# Meetresultaten

In deze bijlage worden alle meetresultaten weergegeven van de meetsets op de Volvo-motor.

*\*Bij de resultaten van de eigenschappen die berekend worden uit het cilinderdrukverloop (IMEP, P<sub>MEP</sub>, P<sub>i</sub>,  $\eta_m$  en  $\eta_i$ ) moet echter een kleine kanttekening bijgemaakt worden. Tijdens de verwerking werd opgemerkt dat de expansie- en compressieslag niet volledig volgens de verwachte polytropen lagen in het pV-diagram en hieruit werd geconcludeerd dat de positie van het TDC opnieuw gekalibreerd moest worden. Bij gebruik van de .prn-files (zie DVD) moet met deze TDC-verschuiving rekening gehouden worden.*

Volvo: 100% Methanol - atmosferisch 40 en 80 Nm

	M100					
Datum	10/04/13	10/04/13	10/04/13	10/04/13	10/04/13	10/04/13
<b>Omgevingsvoorwaarden</b>						
P <sub>atmosfeer</sub> (hPa)	1003,3	1002,8	1002,7	1003,1	1002,9	1002,8
T <sub>atmosfeer</sub> (°C)	20,6	20,7	20,8	20,7	20,7	20,7
relatieve vochtigheid (%)	36,0	36,7	36,5	36,7	36,7	36,8
rho <sub>licht</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	1,185	1,185	1,185	1,185	1,185	1,185
<b>Variërende grootheden</b>						
M <sub>ingesteld</sub> (Nm)	40	40	40	80	80	81
toerental <sub>ingesteld</sub> (rpm)	1499	2501	3502	1500	2500	3500
<b>Gemeten grootheden</b>						
MBT-timing (°ca BTDC)	21	26	26	18	22	24
TP (%)	12,9	19,3	25,5	20,3	26,7	34,1
MAF (g/s)	7,04	13,20	20,43	12,38	20,86	31,29
T <sub>uitlaat,gemiddeld</sub> (°C)	544,6	664,3	730,8	561,4	666,8	719,6
NO <sub>x</sub> (ppm)	1673,1	1550,6	1911,9	2478,8	2596,6	2948,7
CO <sub>2</sub> (vol%)	13,695	13,794	13,808	13,243	13,656	13,700
CO (vol%)	0,583	0,246	0,375	0,725	0,348	0,358
O <sub>2</sub> (vol%)	1,07	1,01	0,98	1,46	1,04	0,97
T <sub>inlaat</sub> (°C)	29,9	25,0	2,9	27,3	21,3	5,1
lambda <sub>sensor</sub> (-)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
<b>Massameting</b>						
Massa voor (kg)	10,713	14,543	18,500	11,896	13,300	16,830
Massa na (kg)	10,491	14,170	17,939	11,539	12,715	15,974
Tijd (s)	180	180	180	180	180	180
<b>Berekende grootheden</b>						
P <sub>e</sub> (kW)	6,279	10,491	14,564	12,548	21,039	29,567
MAF <sub>berekend</sub> (g/s) (via lambda <sub>sensor</sub> )	7,97	13,38	20,19	12,81	20,97	30,84
brandstofverbruik B (kg/h)	4,440	7,460	11,220	7,140	11,700	17,120
BSFC (g/ekWh)	707,15	711,10	770,37	569,03	556,10	579,02
Lambda <sub>berekend</sub> (-) (via MAF)	0,88	0,99	1,01	0,97	0,99	1,02
BMEP (bar)	2,820	2,824	2,799	5,629	5,664	5,685
eta <sub>vol</sub> (%)	34,08%	34,30%	36,95%	54,72%	53,77%	56,44%
<b>Geïndiceerde grootheden</b>						
W <sub>i</sub> (Joule/Cycle)	143,89	155,39	166,19	263,73	274,84	287,77
IMEP (bar)	3,227	3,485	3,728	5,915	6,165	6,455
P <sub>i</sub> (kW)	1,797	3,238	4,849	3,297	5,726	8,394
PMEP (bar)	-0,556	-0,511	-0,607	-0,292	-0,306	-0,414
CoV (-)	0,016	0,018	0,016	0,017	0,013	0,017
eta <sub>m</sub> (%)	87,35%	81,00%	75,08%	95,13%	91,87%	88,07%
eta <sub>i</sub> (%)	29,01%	31,11%	30,98%	33,10%	35,08%	35,14%
eta <sub>e</sub> (%)	25,34%	25,20%	23,26%	31,49%	32,22%	30,95%
<b>Emissies (g/ekWh)</b>						
NO <sub>x</sub>	13,005	12,356	16,377	15,869	16,213	19,125
CO <sub>2</sub>	935,018	963,130	1033,905	743,750	747,586	777,890
CO	25,333	10,932	17,871	25,914	12,125	12,937
<b>Berekende nauwkeurigheden</b>						
dP <sub>e</sub> (kW)	0,096	0,159	0,221	0,103	0,163	0,224
deta (%)	0,42%	0,39%	0,36%	0,29%	0,26%	0,24%
deta <sub>i</sub> (%)	0,21%	0,14%	0,09%	0,17%	0,11%	0,08%
deta <sub>vol</sub> (%)	0,79%	0,88%	0,97%	1,38%	1,39%	1,49%
dbrandstof (kg/h)	0,028	0,029	0,030	0,029	0,030	0,031
dO <sub>2</sub> (vol%)	0,25%	0,25%	0,25%	0,25%	0,25%	0,25%
dCO (vol%)	0,19%	0,18%	0,18%	0,19%	0,18%	0,18%
dCO <sub>2</sub> (vol%)	0,36%	0,36%	0,36%	0,36%	0,36%	0,36%
dNO <sub>x</sub> (ppm)	91,73	90,51	94,12	99,79	100,97	104,49
dBSFC (g/ekWh)	11,77	11,09	11,86	5,21	4,52	4,51
dCO <sub>2</sub> (g/ekWh)	25,73	26,42	28,19	19,68	19,56	20,27
dCO (g/ekWh)	8,12	8,12	8,78	6,74	6,40	6,65
dNO <sub>x</sub> (g/ekWh)	0,51	0,51	0,59	0,49	0,49	0,55

Volvo: 100% Benzine - atmosferisch 40 en 80 Nm

	Benzine					
Datum	19/04/13	19/04/13	19/04/13	19/04/13	19/04/13	19/04/13
<b>Omgevingsvoorwaarden</b>						
P <sub>atmosfeer</sub> (hPa)	1023,0	1022,8	1022,6	1023,0	1022,8	1022,6
T <sub>atmosfeer</sub> (°C)	20,7	20,7	20,8	20,7	20,7	20,7
relatieve vochtigheid (%)	36,6	35,8	35,4	36,1	35,9	35,5
rho <sub>lucht</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	1,209	1,209	1,209	1,209	1,209	1,209
<b>Variërende grootheden</b>						
M <sub>ingesteld</sub> (Nm)	40	40	40	80	80	80
toerental <sub>ingesteld</sub> (rpm)	1500	2503	3501	1502	2498	3501
<b>Gemeten grootheden</b>						
MBT-timing (°ca BTDC)	22	28	31	20	25	29
TP (%)	13,1	20,9	25,5	19,9	27,0	35,1
MAF (g/s)	8,14	15,13	23,19	13,49	23,61	35,11
T <sub>uitlaat,gemiddeld</sub> (°C)	572,6	696,2	763,5	583,5	694,0	748,9
NO <sub>x</sub> (ppm)	2137,8	2231,8	2889,1	3446,5	3302,4	4030,4
CO <sub>2</sub> (vol%)	13,977	14,246	14,494	14,092	14,379	14,451
CO (vol%)	0,345	0,299	0,449	0,486	0,410	0,375
O <sub>2</sub> (vol%)	1,50	1,25	0,82	1,12	0,98	0,93
T <sub>inlaat</sub> (°C)	39,6	33,8	24,0	35,5	30,0	18,1
lambda <sub>sensor</sub> (-)	1,00	1,01	1,00	1,00	1,00	1,00
<b>Massameting</b>						
Massa voor (kg)	0,443	0,431	0,664	0,531	0,457	0,541
Massa na (kg)	0,330	0,240	0,373	0,352	0,151	0,104
Tijd (s)	180	180	180	180	180	180
<b>Berekende grootheden</b>						
P <sub>e</sub> (kW)	6,300	10,576	14,693	12,604	20,920	29,355
MAF <sub>berekend</sub> (g/s) (via lambda <sub>sensor</sub> )	9,18	15,61	23,60	14,56	24,82	35,48
brandstofverbruik B (kg/h)	2,260	3,820	5,820	3,580	6,120	8,740
BSFC (g/ekWh)	358,75	361,19	396,10	284,04	292,54	297,73
Lambda <sub>berekend</sub> (-) (via MAF)	0,89	0,97	0,98	0,93	0,95	0,99
BMEP (bar)	2,826	2,844	2,825	5,648	5,637	5,644
eta <sub>vol</sub> (%)	34,66%	35,33%	38,19%	54,91%	56,27%	57,39%
<b>Geïndiceerde grootheden</b>						
W <sub>i</sub> (Joule/Cycle)	156,87	158,16	167,13	276,05	274,99	285,33
IMEP (bar)	3,519	3,548	3,749	6,192	6,168	6,400
P <sub>i</sub> (kW)	1,961	3,299	4,876	3,455	5,724	8,324
PMEP (bar)	-0,421	-0,578	-0,597	-0,172	-0,338	-0,408
CoV (-)	0,018	0,017	0,020	0,012	0,011	0,014
eta <sub>m</sub> (%)	80,29%	80,15%	75,33%	91,20%	91,37%	88,17%
eta <sub>i</sub> (%)	29,13%	28,99%	28,12%	32,39%	31,40%	31,97%
eta <sub>e</sub> (%)	23,39%	23,23%	21,19%	29,54%	28,69%	28,19%
<b>Emissies (g/ekWh)</b>						
NO <sub>x</sub>	17,054	17,597	24,379	21,368	20,802	25,717
CO <sub>2</sub>	1082,669	1093,922	1187,924	849,025	879,467	897,313
CO	17,008	14,613	23,421	18,636	15,960	14,820
<b>Berekende nauwkeurigheden</b>						
dP <sub>e</sub> (kW)	0,097	0,159	0,221	0,103	0,162	0,224
deta (%)	0,46%	0,39%	0,34%	0,34%	0,26%	0,23%
deta <sub>i</sub> (%)	0,38%	0,22%	0,14%	0,28%	0,16%	0,12%
deta <sub>vol</sub> (%)	0,86%	0,96%	1,05%	1,43%	1,50%	1,60%
dbrandstof (kg/h)	0,028	0,028	0,029	0,028	0,029	0,029
dO <sub>2</sub> (vol%)	0,25%	0,25%	0,25%	0,25%	0,25%	0,25%
dCO (vol%)	0,18%	0,18%	0,18%	0,18%	0,18%	0,18%
dCO <sub>2</sub> (vol%)	0,36%	0,37%	0,37%	0,37%	0,37%	0,37%
dNO <sub>x</sub> (ppm)	96,38	97,32	103,89	109,47	108,02	115,30
dBSFC (g/ekWh)	7,11	6,05	6,27	3,24	2,65	2,48
dCO <sub>2</sub> (g/ekWh)	30,21	29,36	31,20	21,82	22,05	22,36
dCO (g/ekWh)	9,06	8,96	9,65	7,11	7,18	7,27
dNO <sub>x</sub> (g/ekWh)	0,59	0,59	0,72	0,57	0,56	0,64

Volvo: 100% Ethanol - atmosferisch 40 en 80 Nm

	E100					
Datum	08/04/13	08/04/13	08/04/13	08/04/13	08/04/13	08/04/13
<b>Omgevingsvoorwaarden</b>						
P <sub>atmosfeer</sub> (hPa)	1001,1	1001,3	1001,5	1001,2	1001,3	1001,5
T <sub>atmosfeer</sub> (°C)	21,5	21,4	21,2	21,4	21,4	21,3
relatieve vochtigheid (%)	36,0	36,7	36,5	36,7	36,7	36,8
rho <sub>lucht</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	1,183	1,183	1,184	1,183	1,183	1,184
<b>Variërende grootheden</b>						
M <sub>ingesteld</sub> (Nm)	40	40	41	80	80	80
toerental <sub>ingesteld</sub> (rpm)	1502	2501	3503	1500	2501	3502
<b>Gemeten grootheden</b>						
MBT-timing (°ca BTDC)	20	26	27	21	24	26
TP (%)	13,5	19,6	25,5	21,0	26,6	34,6
MAF (g/s)	7,43	13,64	21,76	12,81	21,99	33,15
T <sub>uitlaat,gemiddeld</sub> (°C)	561,9	674,7	743,6	560,3	669,3	728,2
NO <sub>x</sub> (ppm)	1210,8	1740,7	2176,9	2306,8	2836,5	3290,1
CO <sub>2</sub> (vol%)	13,041	13,960	14,058	12,796	13,755	13,826
CO (vol%)	0,708	0,352	0,393	0,976	0,396	0,373
O <sub>2</sub> (vol%)	1,90	1,03	0,82	1,96	1,06	0,96
T <sub>inlaat</sub> (°C)	33,9	28,0	7,1	28,2	21,9	8,5
lambda <sub>sensor</sub> (-)	1,00	1,00	0,99	1,00	0,99	1,00
<b>Massameting</b>						
Massa voor (kg)	9,292	12,283	15,298	10,146	11,555	13,850
Massa na (kg)	9,119	11,997	14,857	9,870	11,105	13,191
Tijd (s)	180	180	180	180	180	180
<b>Berekende grootheden</b>						
P <sub>e</sub> (kW)	6,354	10,517	14,936	12,580	20,940	29,479
MAF <sub>berekend</sub> (g/s) (via lambda <sub>sensor</sub> )	8,65	14,25	21,84	13,79	22,35	32,96
brandstofverbruik B (kg/h)	3,460	5,720	8,820	5,520	9,000	13,180
BSFC (g/ekWh)	544,51	543,87	590,52	438,79	429,79	447,09
Lambda <sub>berekend</sub> (-) (via MAF)	0,86	0,95	0,99	0,93	0,98	1,01
BMEP (bar)	2,848	2,830	2,870	5,645	5,636	5,665
eta <sub>vol</sub> (%)	34,86%	34,49%	37,74%	55,66%	54,12%	56,95%
<b>Geïndiceerde grootheden</b>						
W <sub>i</sub> (Joule/Cycle)	157,69	155,46	172,60	273,01	277,39	287,85
IMEP (bar)	3,537	3,487	3,871	6,124	6,222	6,457
P <sub>i</sub> (kW)	1,973	3,240	5,038	3,412	5,781	8,401
PMEP (bar)	-0,496	-0,527	-0,644	-0,240	-0,309	-0,464
CoV (-)	0,031	0,023	0,021	0,032	0,020	0,017
eta <sub>m</sub> (%)	80,51%	81,14%	74,12%	92,17%	90,56%	87,72%
eta <sub>i</sub> (%)	30,47%	30,27%	30,52%	33,03%	34,32%	34,06%
eta <sub>e</sub> (%)	24,53%	24,56%	22,62%	30,44%	31,08%	29,88%
<b>Emissies (g/ekWh)</b>						
NO <sub>x</sub>	8,764	12,180	16,388	13,434	15,819	19,046
CO <sub>2</sub>	990,284	1017,047	1101,310	781,696	800,953	834,657
CO	34,217	16,321	19,595	37,947	14,676	14,331
<b>Berekende nauwkeurigheden</b>						
dP <sub>e</sub> (kW)	0,097	0,159	0,221	0,103	0,163	0,224
deta (%)	0,42%	0,39%	0,34%	0,30%	0,26%	0,24%
deta <sub>i</sub> (%)	0,27%	0,16%	0,11%	0,20%	0,13%	0,09%
deta <sub>vol</sub> (%)	0,81%	0,89%	1,02%	1,40%	1,44%	1,55%
dbrandstof (kg/h)	0,028	0,029	0,029	0,029	0,029	0,030
dO <sub>2</sub> (vol%)	0,25%	0,25%	0,25%	0,25%	0,25%	0,25%
dCO (vol%)	0,19%	0,18%	0,18%	0,19%	0,18%	0,18%
dCO <sub>2</sub> (vol%)	0,36%	0,36%	0,37%	0,35%	0,36%	0,36%
dNO <sub>x</sub> (ppm)	87,11	92,41	96,77	98,07	103,37	107,90
dBSFC (g/ekWh)	9,42	8,64	8,96	4,26	3,62	3,55
dCO <sub>2</sub> (g/ekWh)	27,82	27,48	29,43	20,83	20,68	21,45
dCO (g/ekWh)	9,12	8,53	9,19	7,47	6,83	7,07
dNO <sub>x</sub> (g/ekWh)	0,43	0,46	0,55	0,43	0,46	0,52

Volvo: 95% Ethanol - 5% Water - atmosferisch 40 en 80 Nm

	E95W5					
Datum	09/04/13	09/04/13	09/04/13	09/04/13	09/04/13	09/04/13
<b>Omgevingsvoorwaarden</b>						
P <sub>atmosfeer</sub> (hPa)	995,4	995,4	995,4	995,4	995,4	995,4
T <sub>atmosfeer</sub> (°C)	21,2	21,2	21,2	21,2	21,2	21,2
relatieve vochtigheid (%)	31,3	31,1	30,9	31,2	31,1	31,0
rho <sub>lucht</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	1,175	1,175	1,175	1,175	1,175	1,175
<b>Variërende grootheden</b>						
M <sub>ingesteld</sub> (Nm)	40	40	40	80	80	81
toerental <sub>ingesteld</sub> (rpm)	1499	2501	3501	1500	2500	3501
<b>Gemeten grootheden</b>						
MBT-timing (°ca BTDC)	22	26	28	22	25	27
TP (%)	13,5	19,6	24,7	21,5	26,8	34,2
MAF (g/s)	8,05	14,01	22,12	13,63	22,84	33,78
T <sub>uitlaat,gemiddeld</sub> (°C)	556,2	672,4	736,3	549,3	664,0	720,8
NO <sub>x</sub> (ppm)	934,4	1291,1	1827,6	1924,1	2420,2	2884,2
CO <sub>2</sub> (vol%)	12,889	13,546	13,775	12,336	13,514	13,620
CO (vol%)	0,949	0,370	0,421	1,030	0,445	0,422
O <sub>2</sub> (vol%)	1,76	1,14	0,81	2,20	1,10	0,94
T <sub>inlaat</sub> (°C)	30,4	25,5	7,6	23,9	22,1	9,9
lambda <sub>sensor</sub> (-)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
<b>Massameting</b>						
Massa voor (kg)	6,903	9,705	13,582	7,746	8,925	11,933
Massa na (kg)	6,715	9,400	13,117	7,446	8,451	11,236
Tijd (s)	180	180	180	180	180	180
<b>Berekende grootheden</b>						
P <sub>e</sub> (kW)	6,304	10,508	14,764	12,636	21,066	29,602
MAF <sub>berekend</sub> (g/s) (via lambda <sub>sensor</sub> )	8,82	14,33	21,68	14,03	22,19	32,69
brandstofverbruik B (kg/h)	3,760	6,100	9,300	6,000	9,480	13,940
BSFC (g/ekWh)	596,45	580,51	629,92	474,82	450,02	470,92
Lambda <sub>berekend</sub> (-) (via MAF)	0,91	0,98	1,02	0,97	1,03	1,03
BMEP (bar)	2,831	2,828	2,838	5,670	5,670	5,690
eta <sub>vol</sub> (%)	36,19%	35,25%	38,10%	57,54%	54,59%	57,44%
<b>Geïndiceerde grootheden</b>						
W <sub>i</sub> (Joule/Cycle)	155,13	158,90	171,93	269,47	277,82	290,61
IMEP (bar)	3,480	3,564	3,856	6,044	6,231	6,518
P <sub>i</sub> (kW)	1,938	3,311	5,016	3,368	5,789	8,479
PMEP (bar)	-0,475	-0,473	-0,638	-0,206	-0,283	-0,469
CoV (-)	0,043	0,031	0,019	0,044	0,029	0,014
eta <sub>m</sub> (%)	81,33%	79,33%	73,58%	93,79%	90,98%	87,28%
eta <sub>i</sub> (%)	29,37%	30,94%	30,74%	31,99%	34,80%	34,66%
eta <sub>e</sub> (%)	23,89%	24,54%	22,62%	30,01%	31,66%	30,25%
<b>Emissies (g/ekWh)</b>						
NO <sub>x</sub>	7,654	10,232	15,439	12,904	14,830	18,391
CO <sub>2</sub>	998,726	1015,840	1098,757	787,905	783,203	821,104
CO	46,801	17,659	21,372	41,870	16,414	16,192
<b>Berekende nauwkeurigheden</b>						
dP <sub>e</sub> (kW)	0,096	0,159	0,221	0,103	0,163	0,224
deta (%)	0,41%	0,39%	0,35%	0,28%	0,26%	0,24%
deta <sub>i</sub> (%)	0,24%	0,16%	0,11%	0,19%	0,13%	0,09%
deta <sub>vol</sub> (%)	0,89%	0,93%	1,04%	1,51%	1,51%	1,60%
dbrandstof (kg/h)	0,028	0,029	0,029	0,029	0,029	0,030
dO <sub>2</sub> (vol%)	0,25%	0,25%	0,25%	0,25%	0,25%	0,25%
dCO (vol%)	0,19%	0,18%	0,18%	0,19%	0,18%	0,18%
dCO <sub>2</sub> (vol%)	0,35%	0,36%	0,36%	0,35%	0,36%	0,36%
dNO <sub>x</sub> (ppm)	84,34	87,91	93,28	94,24	99,20	103,84
dBSFC (g/ekWh)	10,18	9,17	9,63	4,49	3,74	3,71
dCO <sub>2</sub> (g/ekWh)	28,02	27,90	29,73	21,42	20,42	21,28
dCO (g/ekWh)	9,48	8,79	9,38	7,85	6,82	7,09
dNO <sub>x</sub> (g/ekWh)	0,45	0,47	0,57	0,46	0,46	0,53

Volvo: 90% Ethanol - 10% Water - atmosferisch 40 en 80 Nm

	E90W10					
Datum	09/04/13	09/04/13	09/04/13	09/04/13	09/04/13	09/04/13
<b>Omgevingsvoorwaarden</b>						
P <sub>atmosfeer</sub> (hPa)	996,5	996,6	996,7	996,6	996,6	996,6
T <sub>atmosfeer</sub> (°C)	20,7	20,9	20,9	20,8	20,9	20,9
relatieve vochtigheid (%)	27,9	26,0	25,6	27,0	26,2	25,6
rho <sub>lucht</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	1,179	1,179	1,179	1,179	1,178	1,179
<b>Variërende grootheden</b>						
M <sub>ingesteld</sub> (Nm)	40	40	40	80	81	80
toerental <sub>ingesteld</sub> (rpm)	1498	2501	3502	1499	2501	3502
<b>Gemeten grootheden</b>						
MBT-timing (°ca BTDC)	22	27	29	23	26	27
TP (%)	13,9	19,9	25,3	21,7	27,2	34,4
MAF (g/s)	7,82	13,59	21,10	13,42	21,48	32,80
T <sub>uitlaat,gemiddeld</sub> (°C)	558,2	669,8	734,4	551,1	660,6	719,8
NO <sub>x</sub> (ppm)	731,6	1100,8	1629,9	1589,5	2165,0	2575,5
CO <sub>2</sub> (vol%)	12,751	13,717	14,013	12,479	13,669	13,807
CO (vol%)	0,928	0,422	0,463	1,058	0,451	0,422
O <sub>2</sub> (vol%)	2,03	1,20	0,74	2,24	1,17	0,93
T <sub>inlaat</sub> (°C)	31,1	25,4	8,3	26,0	23,2	10,3
lambda <sub>sensor</sub> (-)	1,00	1,01	0,99	1,00	1,00	1,00
<b>Massameting</b>						
Massa voor (kg)	7,743	11,048	13,929	8,570	10,056	12,452
Massa na (kg)	7,543	10,725	13,435	8,250	9,548	11,709
Tijd (s)	180	180	180	180	180	180
<b>Berekende grootheden</b>						
P <sub>e</sub> (kW)	6,261	10,491	14,845	12,522	21,099	29,404
MAF <sub>berekend</sub> (g/s) (via lambda <sub>sensor</sub> )	8,75	14,22	21,49	14,01	22,19	32,62
brandstofverbruik B (kg/h)	4,000	6,460	9,880	6,400	10,160	14,860
BSFC (g/ekWh)	638,83	615,76	665,54	511,11	481,54	505,37
Lambda <sub>berekend</sub> (-) (via MAF)	0,89	0,96	0,97	0,96	0,97	1,01
BMEP (bar)	2,814	2,823	2,853	5,623	5,678	5,652
eta <sub>vol</sub> (%)	36,22%	35,28%	38,10%	57,98%	55,08%	57,80%
<b>Geïndiceerde grootheden</b>						
W <sub>i</sub> (Joule/Cycle)	153,93	159,23	170,70	271,04	280,26	286,14
IMEP (bar)	3,453	3,572	3,829	6,079	6,286	6,418
P <sub>i</sub> (kW)	1,921	3,319	4,982	3,385	5,841	8,350
PMEP (bar)	-0,511	-0,542	-0,667	-0,245	-0,334	-0,481
CoV (-)	0,065	0,037	0,019	0,042	0,033	0,023
eta <sub>m</sub> (%)	81,48%	79,03%	74,50%	92,47%	90,31%	88,04%
eta <sub>i</sub> (%)	29,27%	31,31%	30,73%	32,24%	35,03%	34,24%
eta <sub>e</sub> (%)	23,85%	24,74%	22,89%	29,81%	31,64%	30,15%
<b>Emissies (g/ekWh)</b>						
NO <sub>x</sub>	5,937	8,284	12,968	10,352	12,775	15,778
CO <sub>2</sub>	1001,153	1004,245	1082,966	792,157	783,652	824,353
CO	46,373	19,663	22,773	42,744	16,456	16,036
<b>Berekende nauwkeurigheden</b>						
dP <sub>e</sub> (kW)	0,096	0,159	0,221	0,103	0,163	0,224
deta (%)	0,40%	0,39%	0,35%	0,28%	0,26%	0,24%
deta <sub>i</sub> (%)	0,23%	0,15%	0,10%	0,18%	0,12%	0,09%
deta <sub>vol</sub> (%)	0,87%	0,90%	1,00%	1,49%	1,42%	1,55%
dbrandstof (kg/h)	0,028	0,029	0,029	0,029	0,029	0,031
dO <sub>2</sub> (vol%)	0,25%	0,25%	0,25%	0,25%	0,25%	0,25%
dCO (vol%)	0,19%	0,18%	0,18%	0,19%	0,18%	0,18%
dCO <sub>2</sub> (vol%)	0,35%	0,36%	0,37%	0,35%	0,36%	0,36%
dNO <sub>x</sub> (ppm)	82,32	86,01	91,30	90,90	96,65	100,76
dBSFC (g/ekWh)	10,83	9,70	10,11	4,79	3,97	3,99
dCO <sub>2</sub> (g/ekWh)	28,28	27,38	29,02	21,39	20,32	21,23
dCO (g/ekWh)	9,59	8,61	9,11	7,82	6,75	7,02
dNO <sub>x</sub> (g/ekWh)	0,43	0,43	0,51	0,41	0,42	0,48



Volvo: 80% Ethanol - 20% Water - atmosferisch 40 en 80 Nm

	E80W20					
Datum	10/04/13	10/04/13	10/04/13	10/04/13	10/04/13	10/04/13
<b>Omgevingsvoorwaarden</b>						
P <sub>atmosfeer</sub> (hPa)	1005,5	1005,1	1004,9	1005,3	1005,2	1005,1
T <sub>atmosfeer</sub> (°C)	20,7	21	20,9	21	21	20,9
relatieve vochtigheid (%)	34,6	34,7	35,0	34,4	34,6	34,8
ρ <sub>lucht</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	1,188	1,187	1,187	1,187	1,187	1,187
<b>Variërende grootheden</b>						
M <sub>ingesteld</sub> (Nm)	40	40	41	80	80	80
toerental <sub>ingesteld</sub> (rpm)	1501	2501	3502	1500	2501	3502
<b>Gemeten grootheden</b>						
MBT-timing (°ca BTDC)	29	32	32	28	29	32
TP (%)	13,3	19,7	24,7	21,3	27,4	34,2
MAF (g/s)	7,81	13,69	21,52	13,12	22,29	33,02
T <sub>uitlaat,gemiddeld</sub> (°C)	538,2	662,5	720,6	534,6	650,5	702,0
NO <sub>x</sub> (ppm)	783,6	777,5	1041,8	1337,7	1551,8	2091,8
CO <sub>2</sub> (vol%)	13,025	14,031	14,180	12,510	13,757	13,973
CO (vol%)	0,801	0,444	0,420	0,873	0,454	0,471
O <sub>2</sub> (vol%)	1,85	1,09	0,98	2,48	1,33	1,06
T <sub>inlaat</sub> (°C)	30,1	24,9	10,6	20,8	21,4	11,9
λ <sub>sensor</sub> (-)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
<b>Massameting</b>						
Massa voor (kg)	6,883	11,459	15,485	8,813	10,432	13,201
Massa na (kg)	6,653	11,084	14,914	8,440	9,843	12,343
Tijd (s)	180	180	180	180	180	180
<b>Berekende grootheden</b>						
P <sub>e</sub> (kW)	6,300	10,511	14,912	12,594	21,052	29,370
MAF <sub>berekend</sub> (g/s) (via λ <sub>sensor</sub> )	8,71	14,25	21,68	14,12	22,38	32,48
brandstofverbruik B (kg/h)	4,600	7,500	11,420	7,460	11,780	17,160
BSFC (g/ekWh)	730,16	713,52	765,84	592,34	559,57	584,27
λ <sub>berekend</sub> (-) (via MAF)	0,89	0,96	0,99	0,93	1,00	1,01
BMEP (bar)	2,825	2,828	2,866	5,650	5,665	5,644
η <sub>vol</sub> (%)	36,69%	36,06%	39,18%	59,59%	56,65%	58,70%
<b>Geïndiceerde grootheden</b>						
W <sub>i</sub> (Joule/Cycle)	150,87	158,71	169,97	270,90	277,67	288,72
IMEP (bar)	3,384	3,560	3,812	6,076	6,228	6,476
P <sub>i</sub> (kW)	1,887	3,308	4,960	3,387	5,787	8,426
PMEP (bar)	-0,546	-0,510	-0,619	-0,254	-0,287	-0,411
CoV (-)	0,066	0,023	0,031	0,033	0,025	0,017
η <sub>m</sub> (%)	83,46%	79,43%	75,16%	92,96%	90,94%	87,14%
η <sub>i</sub> (%)	28,85%	31,03%	30,55%	31,93%	34,55%	34,53%
η <sub>e</sub> (%)	24,08%	24,64%	22,96%	29,68%	31,42%	30,09%
<b>Emissies (g/ekWh)</b>						
NO <sub>x</sub>	6,691	6,287	8,987	9,538	9,978	13,864
CO <sub>2</sub>	1002,139	1007,509	1083,476	806,755	789,124	823,362
CO	39,223	20,291	20,425	35,831	16,574	17,664
<b>Berekende nauwkeurigheden</b>						
dP <sub>e</sub> (kW)	0,097	0,159	0,221	0,103	0,163	0,224
dη <sub>e</sub> (%)	0,40%	0,38%	0,35%	0,27%	0,26%	0,24%
dη <sub>i</sub> (%)	0,20%	0,13%	0,09%	0,16%	0,11%	0,08%
dη <sub>vol</sub> (%)	0,87%	0,91%	1,02%	1,46%	1,48%	1,56%
dbrandstof (kg/h)	0,029	0,029	0,030	0,029	0,030	0,031
dO <sub>2</sub> (vol%)	0,25%	0,25%	0,25%	0,25%	0,25%	0,25%
dCO (vol%)	0,19%	0,18%	0,18%	0,19%	0,18%	0,18%
dCO <sub>2</sub> (vol%)	0,36%	0,37%	0,37%	0,35%	0,36%	0,36%
dNO <sub>x</sub> (ppm)	82,84	82,78	85,42	88,38	90,52	95,92
dBSFC (g/ekWh)	12,08	11,11	11,53	5,37	4,55	4,58
dCO <sub>2</sub> (g/ekWh)	28,08	27,18	28,96	21,92	20,45	21,10
dCO (g/ekWh)	9,31	8,46	8,98	7,83	6,76	6,95
dNO <sub>x</sub> (g/ekWh)	0,45	0,43	0,48	0,43	0,40	0,46

Volvo: GEM A - G15 E85 M0 - atmosferisch 20 en 40 Nm

	G15 E85 M0									
Datum	24/04/13	24/04/13	23/04/13	24/04/13	23/04/13	24/04/13	24/04/13	23/04/13	24/04/13	23/04/13
<b>Omgevingsvoorwaarden</b>										
P <sub>atmosfeer</sub> (hPa)	1022,8	1022,9	1019,9	1023,0	1019,8	1022,7	1022,9	1019,8	1022,9	1019,6
T <sub>atmosfeer</sub> (°C)	22,3	22,2	22	22,2	22,6	22,3	22,1	22,1	22,1	22,5
relatieve vochtigheid (%)	41,7	41,5	39,1	41,5	37,7	41,6	41,8	38,6	41,6	37,5
ρ <sub>lucht</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	1,202	1,202	1,200	1,202	1,197	1,202	1,203	1,199	1,203	1,198
<b>Variërende grootheden</b>										
M <sub>ingesteld</sub> (Nm)	20	20	20	20	20	40	40	40	40	40
toerental <sub>ingesteld</sub> (rpm)	1500	2000	2500	2998	3500	1499	2000	2500	3001	3501
<b>Gemeten grootheden</b>										
MBT-timing (°ca BTDC)	25	27	28	28	28	22	24	26	29	30
TP (%)	9,5	12,5	16,2	18,2	22,6	13,1	16,6	21,1	22,6	26,6
MAF (g/s)	4,64	7,32	9,43	12,21	15,94	7,38	10,74	14,13	17,37	22,18
T <sub>uitlaat,gemiddeld</sub> (°C)	545,5	598,5	652,6	703,1	733,2	555,9	629,7	682,2	698,8	739,8
NO <sub>x</sub> (ppm)	838,0	928,9	803,4	758,8	1164,1	1620,7	1613,2	1624,6	2019,7	2421,7
CO <sub>2</sub> (vol%)	14,080	14,117	14,485	14,510	14,246	14,295	14,120	14,381	14,234	14,198
CO (vol%)	0,490	0,488	0,295	0,249	0,313	0,630	0,597	0,362	0,294	0,363
O <sub>2</sub> (vol%)	1,30	1,28	0,91	0,83	1,01	1,12	1,20	1,12	1,19	1,04
T <sub>inlaat</sub> (°C)	39,4	37,6	33,9	20,7	18,3	36,4	33,8	29,7	12,3	8,2
λ <sub>sensor</sub> (-)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,01	1,00
<b>Massameting</b>										
Massa voor (kg)	9,935	12,344	11,925	14,081	15,158	11,437	13,554	13,680	16,990	18,440
Massa na (kg)	9,825	12,192	11,733	13,843	14,859	11,280	13,342	13,414	16,668	18,037
Tijd (s)	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180
<b>Berekende grootheden</b>										
P <sub>e</sub> (kW)	3,122	4,236	5,251	6,328	7,317	6,296	8,377	10,515	12,463	14,702
MAF <sub>berekend</sub> (g/s) (via λ <sub>sensor</sub> )	6,00	8,30	10,47	12,91	16,30	8,51	11,52	14,49	17,63	22,02
brandstofverbruik B (kg/h)	2,200	3,040	3,840	4,760	5,980	3,140	4,240	5,320	6,440	8,060
BSFC (g/ekWh)	704,72	717,63	731,25	752,16	817,23	498,74	506,15	505,93	516,71	548,23
λ <sub>berekend</sub> (-) (via MAF)	0,77	0,89	0,90	0,94	0,98	0,86	0,93	0,98	0,99	1,01
BMEP (bar)	1,401	1,426	1,414	1,420	1,407	2,826	2,819	2,830	2,796	2,826
η <sub>vol</sub> (%)	23,62%	24,50%	24,77%	25,43%	27,61%	33,53%	34,02%	34,29%	34,67%	37,26%
<b>Geïndiceerde grootheden</b>										
W <sub>i</sub> (Joule/Cycle)	89,32	91,28	96,80	97,13	103,39	149,51	150,48	151,51	153,11	162,39
IMEP (bar)	2,003	2,047	2,171	2,179	2,319	3,353	3,375	3,398	3,434	3,642
P <sub>i</sub> (kW)	1,116	1,521	2,017	2,427	3,015	1,868	2,508	3,157	3,828	4,737
PMEP (bar)	-0,653	-0,598	-0,655	-0,683	-0,767	-0,531	-0,459	-0,521	-0,574	-0,659
CoV (-)	0,036	0,020	0,025	0,027	0,025	0,030	0,023	0,018	0,020	0,018
η <sub>m</sub> (%)	69,91%	69,62%	65,10%	65,19%	60,67%	84,26%	83,51%	83,27%	81,39%	77,58%
η <sub>i</sub> (%)	25,01%	24,66%	25,89%	25,13%	24,85%	29,32%	29,15%	29,25%	29,30%	28,97%
η <sub>e</sub> (%)	17,49%	17,17%	16,85%	16,38%	15,08%	24,71%	24,35%	24,36%	23,85%	22,48%
<b>Emissies (g/ekWh)</b>										
NO <sub>x</sub>	9,606	10,790	9,251	9,158	15,171	12,879	13,137	12,949	16,951	21,110
CO <sub>2</sub>	1425,759	1452,201	1500,303	1548,079	1674,127	999,993	1016,633	1033,155	1059,884	1119,148
CO	31,579	31,950	19,447	16,908	23,410	28,049	27,357	16,552	13,933	18,211
<b>Berekende nauwkeurigheden</b>										
dP <sub>e</sub> (kW)	0,095	0,126	0,157	0,189	0,220	0,097	0,127	0,159	0,190	0,221
dη <sub>e</sub> (%)	0,58%	0,54%	0,52%	0,50%	0,46%	0,44%	0,40%	0,39%	0,38%	0,35%
dη <sub>i</sub> (%)	0,33%	0,24%	0,20%	0,16%	0,12%	0,28%	0,21%	0,17%	0,14%	0,11%
dη <sub>vol</sub> (%)	0,50%	0,59%	0,61%	0,65%	0,74%	0,79%	0,86%	0,91%	0,93%	1,02%
dbrandstof (kg/h)	0,028	0,028	0,028	0,029	0,029	0,028	0,028	0,029	0,029	0,029
dO <sub>2</sub> (vol%)	0,25%	0,25%	0,25%	0,25%	0,25%	0,25%	0,25%	0,25%	0,25%	0,25%
dCO (vol%)	0,18%	0,18%	0,18%	0,18%	0,18%	0,19%	0,19%	0,18%	0,18%	0,18%
dCO <sub>2</sub> (vol%)	0,37%	0,37%	0,37%	0,37%	0,37%	0,37%	0,37%	0,37%	0,37%	0,37%
dNO <sub>x</sub> (ppm)	83,38	84,29	83,03	82,59	86,64	91,21	91,13	91,25	95,20	99,22
dBSFC (g/ekWh)	23,25	22,39	22,58	22,88	24,90	8,88	8,41	8,10	8,19	8,47
dCO <sub>2</sub> (g/ekWh)	46,31	46,07	47,12	48,35	52,62	26,94	27,27	27,47	28,35	29,81
dCO (g/ekWh)	12,00	12,18	12,09	12,41	13,73	8,35	8,57	8,41	8,68	9,23
dNO <sub>x</sub> (g/ekWh)	0,64	0,66	0,63	0,65	0,79	0,51	0,52	0,51	0,59	0,67

Volvo: GEM A - G15 E85 M0 - atmosferisch 80 Nm

	G15 E85 M0				
Datum	24/04/13	24/04/13	23/04/13	24/04/13	23/04/13
<b>Omgevingsvoorwaarden</b>					
P <sub>atmosfeer</sub> (hPa)	1022,7	1022,9	1019,7	1022,9	1019,6
T <sub>atmosfeer</sub> (°C)	22,4	22,3	22,0	22,2	22,7
relatieve vochtigheid (%)	41,4	41,3	38,9	41,4	37,1
ρ <sub>lucht</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	1,201	1,202	1,200	1,202	1,197
<b>Variërende grootheden</b>					
M <sub>ingesteld</sub> (Nm)	80	80	80	80	80
toerental <sub>ingesteld</sub> (rpm)	1500	2000	2500	2999	3500
<b>Gemeten grootheden</b>					
MBT-timing (°ca BTDC)	21	22	22	26	27
TP (%)	20,4	23,6	27,9	31,4	35,4
MAF (g/s)	12,76	17,31	22,28	27,68	33,68
T <sub>uitlaat,gemiddeld</sub> (°C)	565,0	631,8	678,5	698,3	732,5
NO <sub>x</sub> (ppm)	2576,9	2830,3	2591,0	3164,9	3254,4
CO <sub>2</sub> (vol%)	13,500	13,983	14,424	14,343	14,155
CO (vol%)	0,808	0,530	0,362	0,323	0,449
O <sub>2</sub> (vol%)	1,60	1,28	0,94	0,96	0,84
T <sub>inlaat</sub> (°C)	28,9	27,3	24,7	10,2	9,7
λ <sub>sensor</sub> (-)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
<b>Massameting</b>					
Massa voor (kg)	10,738	13,016	12,821	15,142	16,808
Massa na (kg)	10,483	12,684	12,406	14,642	16,198
Tijd (s)	180	180	180	180	180
<b>Berekende grootheden</b>					
P <sub>e</sub> (kW)	12,535	16,762	20,933	25,075	29,385
MAF <sub>berekend</sub> (g/s) (via λ <sub>sensor</sub> )	13,85	18,07	22,54	27,26	33,03
brandstofverbruik B (kg/h)	5,100	6,640	8,300	10,000	12,200
B <sub>SFC</sub> (g/ekWh)	406,88	396,13	396,50	398,80	415,18
λ <sub>berekend</sub> (-) (via MAF)	0,92	0,96	0,99	1,02	1,01
BMEP (bar)	5,625	5,641	5,634	5,627	5,650
η <sub>vol</sub> (%)	54,57%	53,36%	53,34%	53,67%	55,97%
<b>Geïndiceerde grootheden</b>					
W <sub>i</sub> (Joule/Cycle)	270,65	271,10	270,55	268,02	274,55
IMEP (bar)	6,071	6,081	6,068	6,012	6,158
P <sub>i</sub> (kW)	3,382	4,518	5,637	6,698	8,008
PMEP (bar)	-0,238	-0,241	-0,297	-0,333	-0,450
CoV (-)	0,029	0,016	0,018	0,016	0,016
η <sub>m</sub> (%)	92,65%	92,75%	92,83%	93,59%	91,74%
η <sub>i</sub> (%)	32,69%	33,54%	33,48%	33,02%	32,35%
η <sub>e</sub> (%)	30,29%	31,11%	31,08%	30,90%	29,68%
<b>Emissies (g/ekWh)</b>					
NO <sub>x</sub>	17,309	18,250	16,153	20,347	21,438
CO <sub>2</sub>	803,758	799,051	809,748	816,509	842,464
CO	30,617	19,276	12,934	11,703	17,008
<b>Berekende nauwkeurigheden</b>					
dP <sub>e</sub> (kW)	0,103	0,132	0,163	0,193	0,224
dη <sub>e</sub> (%)	0,30%	0,28%	0,26%	0,25%	0,24%
dη <sub>i</sub> (%)	0,21%	0,17%	0,13%	0,11%	0,09%
dη <sub>vol</sub> (%)	1,37%	1,40%	1,44%	1,49%	1,56%
dbrandstof (kg/h)	0,029	0,029	0,029	0,029	0,030
dO <sub>2</sub> (vol%)	0,25%	0,25%	0,25%	0,25%	0,25%
dCO (vol%)	0,19%	0,19%	0,18%	0,18%	0,18%
dCO <sub>2</sub> (vol%)	0,36%	0,36%	0,37%	0,37%	0,37%
dNO <sub>x</sub> (ppm)	100,77	103,30	100,91	106,65	107,54
d <sub>B</sub> SFC (g/ekWh)	4,05	3,57	3,38	3,29	3,32
dCO <sub>2</sub> (g/ekWh)	20,87	20,38	20,33	20,56	21,27
dCO (g/ekWh)	7,19	6,76	6,57	6,65	7,01
dNO <sub>x</sub> (g/ekWh)	0,52	0,53	0,48	0,56	0,58

Volvo: GEM B - G29.5 E42.5 M28 - atmosferisch 20 en 40 Nm

	G29,5 E42,5 M28									
Datum	26/04/13	26/04/13	26/04/13	26/04/13	26/04/13	26/04/13	26/04/13	26/04/13	26/04/13	26/04/13
<b>Omgevingsvoorwaarden</b>										
P <sub>atmosfeer</sub> (hPa)	1010,1	1010,3	1010,5	1010,6	1010,7	1010,2	1010,4	1010,5	1010,7	1010,7
T <sub>atmosfeer</sub> (°C)	20,2	20,5	20,5	20,5	20,4	20,4	20,5	20,5	20,4	20,4
relatieve vochtigheid (%)	39,0	39,0	39,2	40,0	41,0	38,9	39,1	39,5	40,4	40,9
ρ <sub>lucht</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	1,197	1,195	1,195	1,195	1,195	1,196	1,195	1,195	1,196	1,195
<b>Variërende grootheden</b>										
M <sub>ingesteld</sub> (Nm)	20	20	20	20	20	40	40	40	40	40
toerental <sub>ingesteld</sub> (rpm)	1501	1999	2501	3000	3499	1500	2000	2501	3000	3500
<b>Gemeten grootheden</b>										
MBT-timing (°ca BTDC)	25	26	28	29	29	22	23	27	29	30
TP (%)	9,4	13,0	15,6	18,4	21,4	12,9	16,8	19,6	22,3	25,0
MAF (g/s)	5,00	7,63	9,96	12,58	16,06	7,71	11,76	14,70	17,03	20,76
T <sub>uitlaat,gemiddeld</sub> (°C)	548,9	601,0	653,5	698,0	735,7	556,0	632,4	678,3	701,2	742,9
NO <sub>x</sub> (ppm)	918,9	969,8	891,1	971,0	1380,2	2074,7	1756,4	1897,2	2196,5	2544,5
CO <sub>2</sub> (vol%)	13,739	13,878	14,128	14,315	14,198	13,885	13,869	14,006	14,085	14,074
CO (vol%)	0,490	0,477	0,245	0,240	0,256	0,448	0,467	0,288	0,212	0,518
O <sub>2</sub> (vol%)	1,30	1,12	1,04	1,03	0,86	1,09	1,05	1,05	0,92	0,75
T <sub>inlaat</sub> (°C)	38,6	36,5	34,6	19,6	18,4	36,8	33,8	29,6	9,4	7,1
λ <sub>sensor</sub> (-)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
<b>Massameting</b>										
Massa voor (kg)	6,277	8,004	10,029	12,695	16,349	7,354	9,576	11,899	15,104	18,858
Massa na (kg)	6,166	7,852	9,839	12,456	16,051	7,198	9,365	11,636	14,786	18,457
Tijd (s)	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180
<b>Berekende grootheden</b>										
P <sub>e</sub> (kW)	3,117	4,278	5,318	6,388	7,413	6,312	8,413	10,554	12,478	14,597
MAF <sub>berekend</sub> (g/s) (via λ <sub>sensor</sub> )	6,06	8,31	10,39	13,14	16,34	8,54	11,52	14,38	17,47	21,92
brandstofverbruik B (kg/h)	2,220	3,040	3,800	4,780	5,960	3,120	4,220	5,260	6,360	8,020
B <sub>SFC</sub> (g/ekWh)	712,15	710,66	714,49	748,27	803,96	494,30	501,61	498,39	509,71	549,43
λ <sub>berekend</sub> (-) (via MAF)	0,82	0,92	0,96	0,96	0,98	0,90	1,02	1,02	0,98	0,95
BMEP (bar)	1,397	1,440	1,431	1,433	1,426	2,831	2,832	2,840	2,799	2,807
η <sub>vol</sub> (%)	24,01%	24,74%	24,71%	26,07%	27,78%	33,88%	34,30%	34,21%	34,64%	37,27%
<b>Geïndiceerde grootheden</b>										
W <sub>i</sub> (Joule/Cycle)	88,35	97,80	89,80	102,17	104,42	145,00	152,32	143,32	149,69	157,98
IMEP (bar)	1,982	2,194	2,014	2,292	2,342	3,252	3,417	3,215	3,358	3,544
P <sub>i</sub> (kW)	1,105	1,629	1,872	2,554	3,045	1,813	2,538	2,988	3,743	4,608
PMEP (bar)	-0,569	-0,454	-0,717	-0,614	-0,756	-0,440	-0,309	-0,553	-0,542	-0,646
CoV (-)	0,019	0,016	0,031	0,022	0,030	0,018	0,013	0,016	0,016	0,019
η <sub>m</sub> (%)	70,50%	65,64%	71,04%	62,52%	60,86%	87,04%	82,86%	88,32%	83,35%	79,20%
η <sub>i</sub> (%)	24,32%	26,18%	24,06%	26,10%	24,96%	28,38%	29,38%	27,74%	28,74%	28,06%
η <sub>e</sub> (%)	17,15%	17,18%	17,09%	16,32%	15,19%	24,70%	24,34%	24,50%	23,96%	22,22%
<b>Emissies (g/ekWh)</b>										
NO <sub>x</sub>	10,481	11,006	10,169	11,539	17,806	16,363	14,093	15,199	18,065	22,244
CO <sub>2</sub>	1452,901	1451,627	1483,881	1554,854	1668,541	1011,741	1025,312	1031,824	1060,994	1119,602
CO	32,979	31,755	16,377	16,591	19,147	20,776	21,973	13,503	10,164	26,226
<b>Berekende nauwkeurigheden</b>										
dP <sub>e</sub> (kW)	0,095	0,126	0,158	0,189	0,220	0,097	0,127	0,159	0,190	0,221
dη <sub>e</sub> (%)	0,57%	0,53%	0,52%	0,49%	0,46%	0,44%	0,40%	0,39%	0,38%	0,35%
dη <sub>i</sub> (%)	0,32%	0,25%	0,19%	0,16%	0,13%	0,28%	0,21%	0,16%	0,14%	0,11%
dη <sub>vol</sub> (%)	0,54%	0,62%	0,65%	0,68%	0,74%	0,84%	0,96%	0,96%	0,92%	0,96%
dbrandstof (kg/h)	0,028	0,028	0,028	0,029	0,029	0,028	0,028	0,029	0,029	0,029
dO <sub>2</sub> (vol%)	0,25%	0,25%	0,25%	0,25%	0,25%	0,25%	0,25%	0,25%	0,25%	0,25%
dCO (vol%)	0,18%	0,18%	0,18%	0,18%	0,18%	0,18%	0,18%	0,18%	0,18%	0,19%
dCO <sub>2</sub> (vol%)	0,36%	0,36%	0,37%	0,37%	0,37%	0,36%	0,36%	0,37%	0,37%	0,37%
dNO <sub>x</sub> (ppm)	84,19	84,70	83,91	84,71	88,80	95,75	92,56	93,97	96,97	100,45
dB <sub>SFC</sub> (g/ekWh)	23,51	21,97	21,83	22,56	24,18	8,80	8,32	7,96	8,08	8,55
dCO <sub>2</sub> (g/ekWh)	47,63	46,20	46,91	48,67	52,33	27,80	27,86	27,87	28,61	29,87
dCO (g/ekWh)	12,53	12,37	12,22	12,63	13,68	8,58	8,72	8,59	8,74	9,42
dNO <sub>x</sub> (g/ekWh)	0,65	0,65	0,64	0,68	0,83	0,57	0,54	0,55	0,61	0,69

Volvo: GEM B - G29.5 E42.5 M28 - atmosferisch 80 Nm

	G29,5 E42,5 M28				
Datum	26/04/13	26/04/13	26/04/13	26/04/13	26/04/13
<b>Omgevingsvoorwaarden</b>					
P <sub>atmosfeer</sub> (hPa)	1010,1	1010,4	1010,5	1010,6	1010,6
T <sub>atmosfeer</sub> (°C)	20,3	20,4	20,5	20,4	20,3
relatieve vochtigheid (%)	38,9	39,2	39,5	40,4	41,0
ρ <sub>lucht</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	1,196	1,196	1,195	1,196	1,196
<b>Variërende grootheden</b>					
M <sub>ingesteld</sub> (Nm)	80	81	80	80	80
toerental <sub>ingesteld</sub> (rpm)	1503	1999	2501	3000	3500
<b>Gemeten grootheden</b>					
MBT-timing (°ca BTDC)	20	21	22	26	27
TP (%)	20,3	23,7	26,9	31,2	34,4
MAF (g/s)	14,10	18,19	22,60	28,13	33,86
T <sub>uitlaat,gemiddeld</sub> (°C)	569,2	636,6	680,6	700,3	733,9
NO <sub>x</sub> (ppm)	3157,3	3068,7	2805,7	3375,9	3435,0
CO <sub>2</sub> (vol%)	13,643	13,980	14,246	14,052	13,957
CO (vol%)	0,523	0,225	0,274	0,247	0,370
O <sub>2</sub> (vol%)	1,20	1,13	0,95	0,92	0,95
T <sub>inlaat</sub> (°C)	31,3	29,1	25,8	7,7	7,0
λ <sub>sensor</sub> (-)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
<b>Massameting</b>					
Massa voor (kg)	6,709	8,777	10,924	13,962	17,680
Massa na (kg)	6,459	8,448	10,512	13,463	17,073
Tijd (s)	180	180	180	180	180
<b>Berekende grootheden</b>					
P <sub>e</sub> (kW)	12,612	16,873	21,045	25,105	29,273
MAF <sub>berekend</sub> (g/s) (via λ <sub>sensor</sub> )	13,68	18,09	22,54	27,36	33,21
brandstofverbruik B (kg/h)	5,000	6,580	8,240	9,980	12,140
B <sub>SFC</sub> (g/ekWh)	396,44	389,96	391,53	397,53	414,71
λ <sub>berekend</sub> (-) (via MAF)	1,03	1,01	1,00	1,03	1,02
BMEP (bar)	5,649	5,681	5,663	5,632	5,630
η <sub>vol</sub> (%)	54,14%	53,83%	53,65%	54,25%	56,45%
<b>Geïndiceerde grootheden</b>					
W <sub>i</sub> (Joule/Cycle)	259,73	273,62	259,35	268,32	273,04
IMEP (bar)	5,826	6,137	5,817	6,018	6,124
P <sub>i</sub> (kW)	3,252	4,558	5,405	6,708	7,963
PMEP (bar)	-0,147	-0,068	-0,325	-0,301	-0,452
CoV (-)	0,019	0,016	0,013	0,013	0,015
η <sub>m</sub> (%)	96,95%	92,54%	97,34%	93,56%	91,91%
η <sub>i</sub> (%)	31,77%	33,84%	32,04%	32,83%	32,04%
η <sub>e</sub> (%)	30,80%	31,31%	31,19%	30,72%	29,44%
<b>Emissies (g/ekWh)</b>					
NO <sub>x</sub>	20,139	19,272	17,429	21,652	22,994
CO <sub>2</sub>	806,734	810,912	811,621	825,428	853,609
CO	19,683	8,306	9,935	9,234	14,402
<b>Berekende nauwkeurigheden</b>					
dP <sub>e</sub> (kW)	0,103	0,133	0,163	0,193	0,224
dη <sub>e</sub> (%)	0,31%	0,28%	0,26%	0,25%	0,24%
dη <sub>i</sub> (%)	0,21%	0,17%	0,13%	0,11%	0,09%
dη <sub>vol</sub> (%)	1,53%	1,48%	1,47%	1,52%	1,57%
dbrandstof (kg/h)	0,029	0,029	0,029	0,029	0,030
dO <sub>2</sub> (vol%)	0,25%	0,25%	0,25%	0,25%	0,25%
dCO (vol%)	0,19%	0,18%	0,18%	0,18%	0,18%
dCO <sub>2</sub> (vol%)	0,36%	0,36%	0,37%	0,37%	0,36%
dNO <sub>x</sub> (ppm)	106,57	105,69	103,06	108,76	109,35
d <sub>B</sub> SFC (g/ekWh)	3,96	3,50	3,33	3,27	3,33
dCO <sub>2</sub> (g/ekWh)	21,00	20,88	20,58	21,09	21,80
dCO (g/ekWh)	7,00	6,73	6,63	6,83	7,16
dNO <sub>x</sub> (g/ekWh)	0,56	0,54	0,50	0,58	0,61

Volvo: GEM C - G37 E21 M42 - atmosferisch 20 en 40 Nm

	G37 E21 M42									
Datum	19/04/13	19/04/13	19/04/13	19/04/13	19/04/13	19/04/13	19/04/13	19/04/13	19/04/13	19/04/13
<b>Omgevingsvoorwaarden</b>										
P <sub>atmosfeer</sub> (hPa)	1025,6	1025,1	1024,5	1024,1	1023,7	1025,3	1024,8	1024,2	1023,8	1023,6
T <sub>atmosfeer</sub> (°C)	20,9	21,1	21,6	21,6	20,9	21	21,6	21,6	21,4	21,1
relatieve vochtigheid (%)	36,1	35,8	35,2	35,4	37,0	36,1	35,1	35,4	35,8	36,5
ρ <sub>lucht</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	1,210	1,209	1,207	1,207	1,209	1,209	1,207	1,207	1,207	1,208
<b>Variërende grootheden</b>										
M <sub>ingesteld</sub> (Nm)	20	20	20	20	20	40	40	40	41	40
toerental <sub>ingesteld</sub> (rpm)	1500	2001	2500	3002	3500	1501	2001	2500	2999	3501
<b>Gemeten grootheden</b>										
MBT-timing (°ca BTDC)	24	25	26	26	27	21	23	26	29	30
TP (%)	6,3	12,4	14,8	17,4	20,2	12,9	16,3	18,8	20,9	24,1
MAF (g/s)	4,98	7,11	9,52	12,40	16,08	7,84	10,61	13,56	17,22	22,10
T <sub>uitlaat,gemiddeld</sub> (°C)	549,7	608,3	665,8	714,3	747,2	561,0	637,3	684,7	705,7	743,7
NO <sub>x</sub> (ppm)	817,4	940,6	746,0	756,8	1169,2	1948,1	1813,0	1803,9	2235,6	2501,1
CO <sub>2</sub> (vol%)	12,793	14,022	14,579	14,640	14,209	14,333	14,141	14,479	14,337	14,431
CO (vol%)	0,271	0,471	0,352	0,257	0,371	0,265	0,391	0,469	0,289	0,360
O <sub>2</sub> (vol%)	3,38	1,14	0,83	0,87	1,01	1,15	1,10	0,80	0,95	1,02
T <sub>inlaat</sub> (°C)	37,7	34,7	32,7	20,1	14,9	36,0	34,0	30,8	9,7	5,6
λ <sub>sensor</sub> (-)	1,01	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	1,00	1,01
<b>Massameting</b>										
Massa voor (kg)	12,102	14,085	16,643	9,232	15,162	13,501	15,809	18,617	13,333	18,612
Massa na (kg)	11,994	13,935	16,452	8,980	14,863	13,345	15,600	18,355	13,011	18,215
Tijd (s)	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180
<b>Berekende grootheden</b>										
P <sub>e</sub> (kW)	3,117	4,183	5,248	6,329	7,372	6,293	8,389	10,377	12,730	14,618
MAF <sub>berekend</sub> (g/s) (via λ <sub>sensor</sub> )	5,98	8,25	10,46	13,81	16,50	8,62	11,48	14,30	17,75	22,02
brandstofverbruik B (kg/h)	2,160	3,000	3,820	5,040	5,980	3,120	4,180	5,240	6,440	7,940
BSFC (g/ekWh)	692,88	717,13	727,94	796,30	811,17	495,76	498,27	504,95	505,91	543,16
λ <sub>berekend</sub> (-) (via MAF)	0,84	0,86	0,91	0,89	0,98	0,91	0,92	0,94	0,97	1,01
BMEP (bar)	1,399	1,407	1,412	1,419	1,418	2,822	2,822	2,793	2,857	2,811
η <sub>vol</sub> (%)	23,47%	24,31%	24,70%	27,17%	27,78%	33,83%	33,87%	33,78%	34,93%	37,07%
<b>Geïndiceerde grootheden</b>										
W <sub>i</sub> (Joule/Cycle)	87,25	94,75	96,92	103,02	106,42	144,86	150,24	151,06	156,30	167,24
IMEP (bar)	1,957	2,125	2,174	2,311	2,387	3,249	3,370	3,388	3,506	3,751
P <sub>i</sub> (kW)	1,090	1,580	2,020	2,577	3,104	1,812	2,505	3,148	3,906	4,878
PMEP (bar)	-0,658	-0,554	-0,641	-0,627	-0,782	-0,530	-0,429	-0,520	-0,533	-0,608
CoV (-)	0,025	0,014	0,021	0,032	0,026	0,014	0,011	0,014	0,019	0,018
η <sub>m</sub> (%)	71,47%	66,19%	64,96%	61,40%	59,38%	86,84%	83,72%	82,42%	81,48%	74,91%
η <sub>i</sub> (%)	24,51%	25,58%	25,67%	24,83%	25,20%	28,20%	29,10%	29,17%	29,45%	29,83%
η <sub>e</sub> (%)	17,52%	16,93%	16,68%	15,24%	14,97%	24,49%	24,36%	24,04%	24,00%	22,35%
<b>Emissies (g/ekWh)</b>										
NO <sub>x</sub>	9,696	10,595	8,350	9,297	14,900	15,087	14,195	14,012	17,713	21,084
CO <sub>2</sub>	1442,499	1474,614	1510,512	1663,082	1680,108	1034,515	1030,483	1039,426	1053,946	1126,229
CO	19,448	31,525	23,211	18,581	27,920	12,173	18,134	21,428	13,521	17,881
<b>Berekende nauwkeurigheden</b>										
dP <sub>e</sub> (kW)	0,095	0,126	0,157	0,189	0,220	0,097	0,127	0,158	0,190	0,221
dη <sub>e</sub> (%)	0,58%	0,54%	0,52%	0,46%	0,45%	0,44%	0,41%	0,39%	0,37%	0,35%
dη <sub>i</sub> (%)	0,33%	0,25%	0,20%	0,15%	0,13%	0,27%	0,21%	0,17%	0,14%	0,12%
dη <sub>vol</sub> (%)	0,53%	0,57%	0,61%	0,66%	0,74%	0,84%	0,85%	0,87%	0,92%	1,02%
dbrandstof (kg/h)	0,028	0,028	0,028	0,029	0,029	0,028	0,028	0,029	0,029	0,029
dO <sub>2</sub> (vol%)	0,25%	0,25%	0,25%	0,25%	0,25%	0,25%	0,25%	0,25%	0,25%	0,25%
dCO (vol%)	0,18%	0,18%	0,18%	0,18%	0,18%	0,18%	0,18%	0,18%	0,18%	0,18%
dCO <sub>2</sub> (vol%)	0,35%	0,37%	0,37%	0,37%	0,37%	0,37%	0,37%	0,37%	0,37%	0,37%
dNO <sub>x</sub> (ppm)	83,17	84,41	82,46	82,57	86,69	94,48	93,13	93,04	97,36	100,01
dBSFC (g/ekWh)	22,95	22,67	22,50	24,19	24,54	8,85	8,30	8,19	7,87	8,44
dCO <sub>2</sub> (g/ekWh)	48,88	47,17	47,31	51,75	52,67	28,12	27,79	27,52	28,01	29,77
dCO (g/ekWh)	13,14	12,44	12,14	13,22	13,87	8,40	8,55	8,47	8,57	9,14
dNO <sub>x</sub> (g/ekWh)	0,66	0,64	0,60	0,66	0,77	0,54	0,53	0,52	0,59	0,66

Volvo: GEM C - G37 E21 M42 - atmosferisch 80 Nm

Datum	G37 E21 M42				
	19/04/13	19/04/13	19/04/13	19/04/13	19/04/13
<b>Omgevingsvoorwaarden</b>					
P <sub>atmosfeer</sub> (hPa)	1025,4	1025,0	1024,4	1024,0	1023,7
T <sub>atmosfeer</sub> (°C)	21,0	21,4	21,7	21,4	21,0
relatieve vochtigheid (%)	35,8	35,4	35,0	35,6	36,9
ρ <sub>lucht</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	1,209	1,207	1,206	1,207	1,209
<b>Variërende grootheden</b>					
M <sub>ingesteld</sub> (Nm)	80	80	80	80	80
toerental <sub>ingesteld</sub> (rpm)	1501	2001	2501	3001	3500
<b>Gemeten grootheden</b>					
MBT-timing (°ca BTDC)	21	22	23	26	27
TP (%)	18,8	22,6	26,0	29,2	32,9
MAF (g/s)	12,77	17,23	22,10	26,82	34,04
T <sub>uitlaat,gemiddeld</sub> (°C)	570,4	638,7	682,1	704,9	737,1
NO <sub>x</sub> (ppm)	3270,4	3198,6	2985,0	3360,7	3502,1
CO <sub>2</sub> (vol%)	14,130	14,198	14,362	14,369	14,334
CO (vol%)	0,346	0,377	0,225	0,320	0,328
O <sub>2</sub> (vol%)	1,12	0,98	1,02	0,81	0,99
T <sub>inlaat</sub> (°C)	31,6	29,6	26,0	5,7	4,9
λ <sub>sensor</sub> (-)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
<b>Massameting</b>					
Massa voor (kg)	12,731	14,757	17,642	10,823	16,484
Massa na (kg)	12,487	14,432	17,235	10,324	15,881
Tijd (s)	180	180	180	180	180
<b>Berekende grootheden</b>					
P <sub>e</sub> (kW)	12,559	16,808	20,955	25,000	29,305
MAF <sub>berekend</sub> (g/s) (via λ <sub>sensor</sub> )	13,40	17,95	22,40	27,32	33,31
brandstofverbruik B (kg/h)	4,880	6,500	8,140	9,980	12,060
B <sub>SFC</sub> (g/ekWh)	388,57	386,72	388,45	399,20	411,53
λ <sub>berekend</sub> (-) (via MAF)	0,95	0,96	0,99	0,98	1,03
BMEP (bar)	5,631	5,653	5,640	5,606	5,635
η <sub>vol</sub> (%)	52,60%	52,92%	52,89%	53,72%	56,09%
<b>Geïndiceerde grootheden</b>					
W <sub>i</sub> (Joule/Cycle)	260,85	265,27	270,62	273,70	284,28
IMEP (bar)	5,851	5,950	6,070	6,139	6,376
P <sub>i</sub> (kW)	3,263	4,424	5,639	6,845	8,292
PMEP (bar)	-0,274	-0,171	-0,258	-0,313	-0,412
CoV (-)	0,015	0,011	0,011	0,015	0,015
η <sub>m</sub> (%)	96,22%	94,98%	92,90%	91,30%	88,35%
η <sub>i</sub> (%)	32,47%	33,05%	33,64%	33,31%	33,39%
η <sub>e</sub> (%)	31,24%	31,39%	31,25%	30,41%	29,50%
<b>Emissies (g/ekWh)</b>					
NO <sub>x</sub>	19,950	19,372	18,179	20,907	22,556
CO <sub>2</sub>	806,108	800,639	812,839	829,914	855,044
CO	12,563	13,530	8,105	11,763	12,453
<b>Berekende nauwkeurigheden</b>					
dP <sub>e</sub> (kW)	0,103	0,133	0,163	0,193	0,224
dη <sub>e</sub> (%)	0,32%	0,28%	0,27%	0,25%	0,24%
dη <sub>i</sub> (%)	0,22%	0,17%	0,14%	0,11%	0,10%
dη <sub>vol</sub> (%)	1,37%	1,39%	1,43%	1,44%	1,57%
dbrandstof (kg/h)	0,029	0,029	0,029	0,029	0,030
dO <sub>2</sub> (vol%)	0,25%	0,25%	0,25%	0,25%	0,25%
dCO (vol%)	0,18%	0,18%	0,18%	0,18%	0,18%
dCO <sub>2</sub> (vol%)	0,37%	0,37%	0,37%	0,37%	0,37%
dNO <sub>x</sub> (ppm)	107,70	106,99	104,85	108,61	110,02
dB <sub>SFC</sub> (g/ekWh)	3,92	3,50	3,32	3,30	3,30
dCO <sub>2</sub> (g/ekWh)	20,69	20,34	20,55	20,89	21,52
dCO (g/ekWh)	6,67	6,61	6,57	6,74	6,97
dNO <sub>x</sub> (g/ekWh)	0,55	0,53	0,51	0,56	0,59

Volvo: GEM C (Referentie) - G37 E21 M42 - atmosferisch 40 Nm

	G37 E21 M42 (Referentie)		
Datum	26/04/13	26/04/13	26/04/13
<b>Omgevingsvoorwaarden</b>			
P <sub>atmosfeer</sub> (hPa)	1010,0	1010,0	1010,6
T <sub>atmosfeer</sub> (°C)	20,8	20,9	20,5
relatieve vochtigheid (%)	42,4	42,4	40,7
rho <sub>lucht</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	1,193	1,192	1,195
<b>Variërende grootheden</b>			
M <sub>ingesteld</sub> (Nm)	40	40	40
toerental <sub>ingesteld</sub> (rpm)	1497	2500	3500
<b>Gemeten grootheden</b>			
MBT-timing (°ca BTDC)	21	26	29
TP (%)	13,2	19,9	25,1
MAF (g/s)	6,64	13,22	21,87
T <sub>uitlaat,gemiddeld</sub> (°C)	554,8	683,5	743,1
NO <sub>x</sub> (ppm)	1841,8	1697,9	2424,5
CO <sub>2</sub> (vol%)	13,708	14,002	14,049
CO (vol%)	0,327	0,413	0,314
O <sub>2</sub> (vol%)	1,41	1,06	0,96
T <sub>inlaat</sub> (°C)	36,5	29,4	6,6
lambda <sub>sensor</sub> (-)	1,00	1,00	1,00
<b>Massameting</b>			
Massa voor (kg)	7,992	8,654	7,034
Massa na (kg)	7,834	8,381	6,624
Tijd (s)	180	180	180
<b>Berekende grootheden</b>			
P <sub>e</sub> (kW)	6,266	10,496	14,695
MAF <sub>berekend</sub> (g/s) (via lambda <sub>sensor</sub> )	8,72	15,05	22,52
brandstofverbruik B (kg/h)	3,160	5,460	8,200
BSFC (g/ekWh)	504,29	520,18	558,01
Lambda <sub>berekend</sub> (-) (via MAF)	0,76	0,88	0,97
BMEP (bar)	2,818	2,825	2,826
eta <sub>vol</sub> (%)	34,76%	35,93%	38,34%
<b>Geïndiceerde grootheden</b>			
W <sub>i</sub> (Joule/Cycle)	144,03	151,71	157,94
IMEP (bar)	3,231	3,403	3,542
P <sub>i</sub> (kW)	1,797	3,161	4,606
PMEP (bar)	-0,469	-0,496	-0,670
CoV (-)	0,014	0,017	0,018
eta <sub>m</sub> (%)	87,20%	83,01%	79,76%
eta <sub>i</sub> (%)	27,61%	28,11%	27,28%
eta <sub>e</sub> (%)	24,07%	23,34%	21,75%
<b>Emissies (g/ekWh)</b>			
NO <sub>x</sub>	15,603	14,533	21,961
CO <sub>2</sub>	1046,905	1073,904	1160,055
CO	15,894	20,160	16,502
<b>Berekende nauwkeurigheden</b>			
dP <sub>e</sub> (kW)	0,096	0,159	0,221
deta <sub>e</sub> (%)	0,43%	0,37%	0,34%
deta <sub>i</sub> (%)	0,26%	0,16%	0,10%
deta <sub>vol</sub> (%)	0,72%	0,86%	1,02%
dbrandstof (kg/h)	0,028	0,029	0,029
dO <sub>2</sub> (vol%)	0,25%	0,25%	0,25%
dCO (vol%)	0,18%	0,18%	0,18%
dCO <sub>2</sub> (vol%)	0,36%	0,37%	0,37%
dNO <sub>x</sub> (ppm)	93,42	91,98	99,25
dBSFC (g/ekWh)	8,98	8,31	8,62
dCO <sub>2</sub> (g/ekWh)	29,06	28,92	31,12
dCO (g/ekWh)	8,93	9,01	9,64
dNO <sub>x</sub> (g/ekWh)	0,58	0,56	0,70



Volvo: GEM D - G43 E0 M57 - atmosferisch 20 en 40 Nm

	G43 E0 M57									
Datum	02/05/13	02/05/13	02/05/13	02/05/13	02/05/13	02/05/13	02/05/13	02/05/13	02/05/13	02/05/13
<b>Omgevingsvoorwaarden</b>										
P <sub>atmosfeer</sub> (hPa)	1018,6	1018,7	1018,5	1018,9	1018,7	1018,6	1018,6	1018,6	1018,7	1018,8
T <sub>atmosfeer</sub> (°C)	21,8	22,1	22	21,4	21,3	22	21,9	21,9	21,2	21,3
relatieve vochtigheid (%)	38,6	37,9	37,9	38,2	38,1	38,0	38,2	38,1	38,3	38,1
ρ <sub>lucht</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	1,200	1,198	1,199	1,201	1,201	1,199	1,199	1,199	1,202	1,201
<b>Variërende grootheden</b>										
M <sub>ingesteld</sub> (Nm)	20	20	20	20	20	40	40	40	40	40
toerental <sub>ingesteld</sub> (rpm)	1500	1995	2502	3000	3498	1500	2000	2499	3000	3501
<b>Gemeten grootheden</b>										
MBT-timing (°ca BTDC)	25	27	28	29	28	22	23	26	28	30
TP (%)	9,7	13,3	15,9	18,8	21,6	13,7	17,3	20,0	22,6	25,5
MAF (g/s)	4,88	7,08	9,49	12,74	16,15	7,75	10,38	13,81	17,13	21,74
T <sub>uitlaat,gemiddeld</sub> (°C)	549,9	605,4	657,5	703,4	741,3	557,4	634,8	684,4	710,6	748,7
NO <sub>x</sub> (ppm)	1088,9	1101,6	930,2	1009,7	1254,2	2108,3	1872,2	1856,6	2156,1	2467,7
CO <sub>2</sub> (vol%)	14,208	14,047	14,356	13,848	13,750	14,287	14,310	14,218	14,219	13,855
CO (vol%)	0,415	0,531	0,292	0,370	0,223	0,332	0,398	0,382	0,305	0,269
O <sub>2</sub> (vol%)	0,91	1,00	0,96	1,61	2,10	1,06	1,12	1,02	1,28	1,90
T <sub>inlaat</sub> (°C)	39,1	37,9	36,2	23,3	16,9	38,0	35,2	30,8	10,7	8,5
λ <sub>sensor</sub> (-)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	1,00
<b>Massameting</b>										
Massa voor (kg)	12,209	14,160	16,266	9,577	13,310	13,643	15,555	18,176	12,330	17,131
Massa na (kg)	12,100	14,007	16,075	9,333	13,009	13,485	15,342	17,908	11,999	16,730
Tijd (s)	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180
<b>Berekende grootheden</b>										
P <sub>e</sub> (kW)	3,180	4,240	5,274	6,376	7,400	6,279	8,427	10,589	12,430	14,813
MAF <sub>berekend</sub> (g/s) (via λ <sub>sensor</sub> )	5,95	8,35	10,45	13,34	16,51	8,65	11,67	14,65	17,99	21,86
brandstofverbruik B (kg/h)	2,180	3,060	3,820	4,880	6,020	3,160	4,260	5,360	6,620	8,020
B <sub>SFC</sub> (g/ekWh)	685,48	721,72	724,35	765,34	813,51	503,29	505,52	506,19	532,60	541,43
λ <sub>berekend</sub> (-) (via MAF)	0,82	0,85	0,91	0,96	0,98	0,90	0,89	0,94	0,95	0,99
BMEP (bar)	1,427	1,430	1,419	1,430	1,424	2,817	2,836	2,852	2,788	2,847
η <sub>vol</sub> (%)	23,63%	24,93%	24,88%	26,43%	28,03%	34,32%	34,73%	34,91%	35,62%	37,10%
<b>Geïndiceerde grootheden</b>										
W <sub>i</sub> (Joule/Cycle)	84,43	91,73	94,33	104,03	100,22	138,48	147,32	149,82	156,14	155,46
IMEP (bar)	1,894	2,058	2,116	2,333	2,248	3,106	3,304	3,360	3,502	3,487
P <sub>i</sub> (kW)	1,055	1,525	1,967	2,601	2,922	1,731	2,455	3,119	3,904	4,536
PMEP (bar)	-0,617	-0,505	-0,587	-0,591	-0,714	-0,484	-0,371	-0,439	-0,484	-0,582
CoV (-)	0,020	0,016	0,030	0,020	0,026	0,017	0,016	0,016	0,016	0,018
η <sub>m</sub> (%)	75,36%	69,51%	67,04%	61,28%	63,32%	90,67%	85,81%	84,86%	79,59%	81,65%
η <sub>i</sub> (%)	23,60%	24,30%	25,11%	25,99%	23,67%	26,72%	28,11%	28,38%	28,76%	27,58%
η <sub>e</sub> (%)	17,79%	16,89%	16,83%	15,93%	14,99%	24,22%	24,12%	24,09%	22,89%	22,52%
<b>Emissies (g/ekWh)</b>										
NO <sub>x</sub>	11,956	12,767	10,762	12,561	16,792	16,986	15,071	15,047	18,296	21,792
CO <sub>2</sub>	1408,524	1470,707	1501,317	1576,550	1693,165	1040,182	1040,123	1042,489	1102,716	1123,322
CO	26,184	35,383	19,435	26,809	17,477	15,384	18,412	17,826	15,054	13,881
<b>Berekende nauwkeurigheden</b>										
dP <sub>e</sub> (kW)	0,095	0,126	0,158	0,189	0,220	0,097	0,127	0,158	0,190	0,221
dη <sub>e</sub> (%)	0,58%	0,53%	0,52%	0,48%	0,45%	0,43%	0,40%	0,38%	0,36%	0,35%
dη <sub>i</sub> (%)	0,32%	0,23%	0,19%	0,16%	0,12%	0,26%	0,20%	0,16%	0,13%	0,11%
dη <sub>vol</sub> (%)	0,53%	0,57%	0,61%	0,69%	0,75%	0,84%	0,84%	0,90%	0,92%	1,01%
dbrandstof (kg/h)	0,028	0,028	0,028	0,029	0,029	0,028	0,028	0,029	0,029	0,029
dO <sub>2</sub> (vol%)	0,25%	0,25%	0,25%	0,25%	0,25%	0,25%	0,25%	0,25%	0,25%	0,25%
dCO (vol%)	0,18%	0,19%	0,18%	0,18%	0,18%	0,18%	0,18%	0,18%	0,18%	0,18%
dCO <sub>2</sub> (vol%)	0,37%	0,37%	0,37%	0,36%	0,36%	0,37%	0,37%	0,37%	0,37%	0,36%
dNO <sub>x</sub> (ppm)	85,89	86,02	84,30	85,10	87,54	96,08	93,72	93,57	96,56	99,68
d <sub>B</sub> SFC (g/ekWh)	22,29	22,43	22,30	23,10	24,50	8,96	8,36	8,04	8,45	8,31
dCO <sub>2</sub> (g/ekWh)	45,41	46,65	47,28	49,89	53,85	28,26	27,85	27,85	29,52	30,38
dCO (g/ekWh)	11,67	12,44	12,20	13,36	14,30	8,51	8,53	8,60	9,05	9,44
dNO <sub>x</sub> (g/ekWh)	0,65	0,69	0,65	0,72	0,83	0,59	0,55	0,55	0,62	0,69

Volvo: GEM D - G43 E0 M57 - atmosferisch 80 Nm

Datum	G43 E0 M57				
	02/05/13	02/05/13	02/05/13	02/05/13	02/05/13
<b>Omgevingsvoorwaarden</b>					
P <sub>atmosfeer</sub> (hPa)	1018,5	1018,6	1018,5	1018,8	1018,8
T <sub>atmosfeer</sub> (°C)	21,9	22,0	22,0	21,5	21,5
relatieve vochtigheid (%)	38,3	37,9	37,7	37,8	38,0
ρ <sub>lucht</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	1,199	1,199	1,199	1,201	1,201
<b>Variërende grootheden</b>					
M <sub>ingesteld</sub> (Nm)	80	80	80	80	80
toerental <sub>ingesteld</sub> (rpm)	1501	2000	2489	3000	3499
<b>Gemeten grootheden</b>					
MBT-timing (°ca BTDC)	21	21	23	26	28
TP (%)	20,3	23,9	27,0	30,9	34,0
MAF (g/s)	12,86	17,42	22,37	27,49	33,01
T <sub>uitlaat,gemiddeld</sub> (°C)	570,5	641,0	680,3	703,9	736,9
NO <sub>x</sub> (ppm)	3374,7	3146,9	2947,1	3307,4	3415,8
CO <sub>2</sub> (vol%)	14,027	14,417	14,190	14,003	13,590
CO (vol%)	0,411	0,265	0,322	0,359	0,320
O <sub>2</sub> (vol%)	1,08	1,01	1,01	1,35	2,06
T <sub>inlaat</sub> (°C)	32,2	30,9	25,9	8,2	6,6
λ <sub>sensor</sub> (-)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
<b>Massameting</b>					
Massa voor (kg)	12,907	15,032	17,081	10,687	14,736
Massa na (kg)	12,657	14,705	16,670	10,181	14,106
Tijd (s)	180	180	180	180	185
<b>Berekende grootheden</b>					
P <sub>e</sub> (kW)	12,634	16,800	20,920	25,211	29,335
MAF <sub>berekend</sub> (g/s) (via λ <sub>sensor</sub> )	13,64	17,88	22,43	27,64	33,38
brandstofverbruik B (kg/h)	5,000	6,540	8,220	10,120	12,259
BSEC (g/ekWh)	395,76	389,28	392,92	401,42	417,92
λ <sub>berekend</sub> (-) (via MAF)	0,94	0,97	1,00	0,99	0,98
BMEP (bar)	5,664	5,654	5,657	5,655	5,642
η <sub>vol</sub> (%)	54,10%	53,24%	53,66%	54,77%	56,73%
<b>Geïndiceerde grootheden</b>					
W <sub>i</sub> (Joule/Cycle)	253,51	261,33	259,82	271,00	266,45
IMEP (bar)	5,686	5,862	5,828	6,079	5,977
P <sub>i</sub> (kW)	3,171	4,355	5,389	6,776	7,770
PMEP (bar)	-0,214	-0,107	-0,194	-0,218	-0,340
CoV (-)	0,013	0,011	0,013	0,013	0,016
η <sub>m</sub> (%)	99,59%	96,45%	97,06%	93,02%	94,39%
η <sub>i</sub> (%)	30,93%	32,47%	31,97%	32,65%	30,91%
η <sub>e</sub> (%)	30,81%	31,32%	31,03%	30,37%	29,17%
<b>Emissies (g/ekWh)</b>					
NO <sub>x</sub>	21,612	19,527	18,614	21,378	23,638
CO <sub>2</sub>	813,159	808,377	812,539	827,737	863,605
CO	15,164	9,457	11,735	13,506	12,942
<b>Berekende nauwkeurigheden</b>					
dP <sub>e</sub> (kW)	0,103	0,132	0,162	0,193	0,224
dη <sub>e</sub> (%)	0,31%	0,28%	0,26%	0,25%	0,23%
dη <sub>i</sub> (%)	0,20%	0,16%	0,13%	0,11%	0,09%
dη <sub>vol</sub> (%)	1,40%	1,42%	1,46%	1,49%	1,53%
dbrandstof (kg/h)	0,029	0,029	0,029	0,029	0,029
dO <sub>2</sub> (vol%)	0,25%	0,25%	0,25%	0,25%	0,25%
dCO (vol%)	0,18%	0,18%	0,18%	0,18%	0,18%
dCO <sub>2</sub> (vol%)	0,37%	0,37%	0,37%	0,37%	0,36%
dNO <sub>x</sub> (ppm)	108,75	106,47	104,47	108,07	109,16
dBSEC (g/ekWh)	3,95	3,51	3,34	3,29	3,34
dCO <sub>2</sub> (g/ekWh)	20,91	20,43	20,63	21,12	22,45
dCO (g/ekWh)	6,81	6,52	6,69	6,92	7,42
dNO <sub>x</sub> (g/ekWh)	0,58	0,54	0,53	0,58	0,64

## Bijlage E

# TDC calibration

In this appendix a detailed discription is given of how to calibrate the Top Dead Center (TDC).

### **Contents:**

- E.1: Installation of the capacitive probe AVL-428 in the engine
- E.2: Power supply and balancing the probes
- E.3: Calibrate the TDC

## E.1 Installation of the capacitive probe AVL-428 in the engine

- Remove the spark plug from the cylinder of which one wants to determine the top dead center.
- Put the piston in the top dead center position. This has to be done manually.
- Put the capacitive probe where the spark plug was installed.
  - There are three parts: the probe, the clamping cone and the adjustment piece (see Figure E.1)

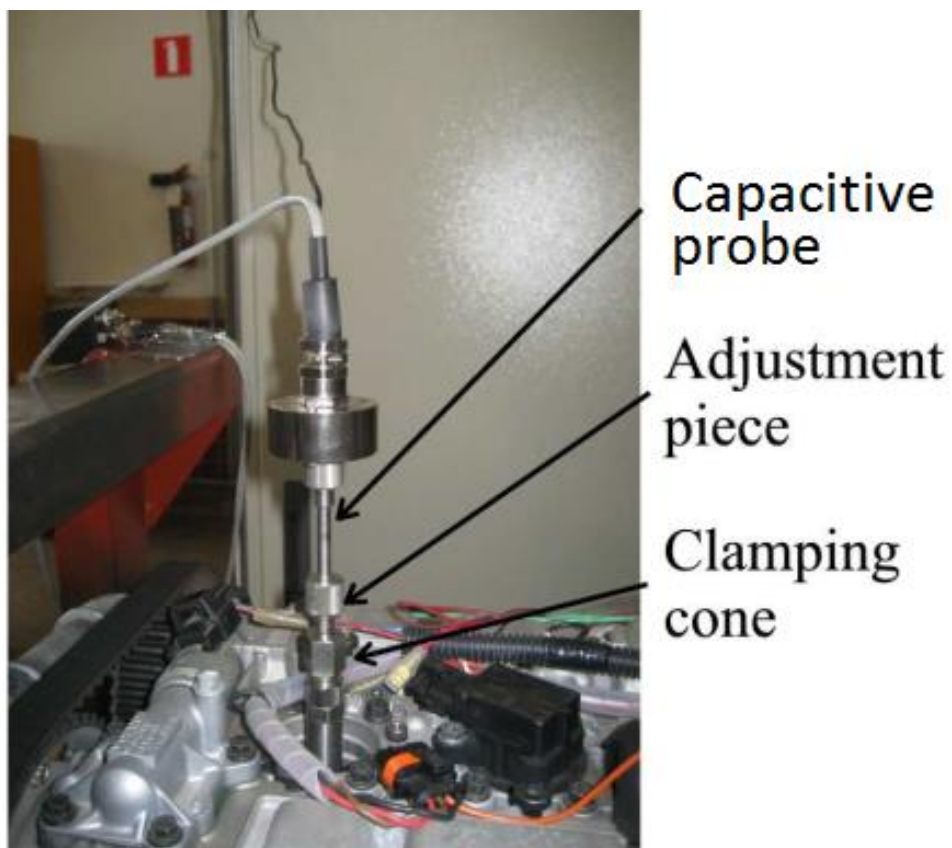
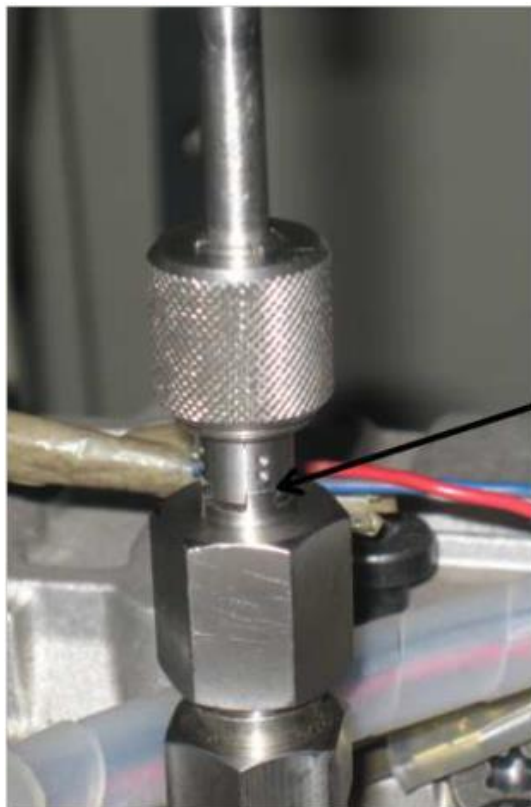


Figure E.1: Installation capacitive probe AVL-428

- In the adjustment piece, there are four notches (see Figure E.2 that fit into the clamping cone. The capacitive probe slides into the adjustment piece and clamping cone and the clamping cone must be located under the adjustment piece.
- Place the biggest notch of the adjustment piece into the clamping cone and slide the probe into the cylinder until it touches the piston.

- Now tighten the adjustment piece manually. The sensor and adjustment piece are now connected to each other and cannot move independently anymore.
- Choose the sensitivity of the sensor. This is done by changing to one of the three other notches. How bigger the notch, how stronger the signal. When the appropriate notch is chosen, the clamping cone has to be fixed to the rest. The position of the notch relative to the piston will determine the signal strength.



Notch of  
adjustment piece

Figure E.2: Notches of adjustment piece

## **E.2 Power supply and balancing the probe**

- The probe is powered with a DC voltage of -15V and 15V.
- After the probe is put in place and connected to the power supply, the probe needs to be balanced. Attach the connection of the probe to the balancing unit.
- Turn the adjustment screw until both LED's are out. When both LED's are out, the probe is balanced (see Figure E.3).

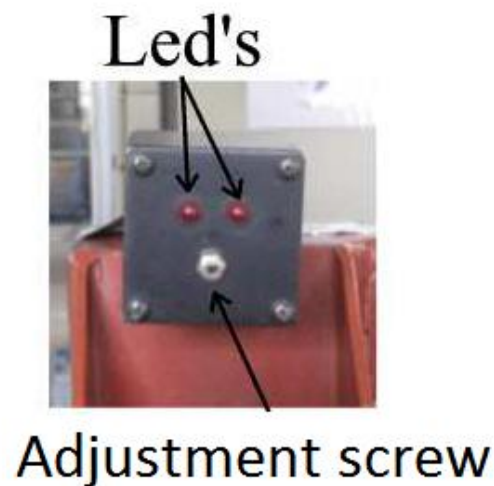


Figure E.3: Balancing unit

### E.3 Calibrate the TDC

- Attach the probe to the DAQ-card (DAQ3/mod4/ai3) and open the labview program 'TDC calibration.vi' (VOLVO: *D:/Studenten/Labview program Volvo/TDC calibration v2*).
- Let the engine run on compression (Audi, CFR) or with the start engine (Volvo).
- Check the TDC with the labview program (see Figure E.4) and adjust the bolt at the crankangle encoder to change the position of the top dead center.

Note: If you encounter a error 'Reshape problem, number of elements...'; rename TDC4 to TDC or any other name before every measurement.

```
TDC4 = transpose(TDC);
```

```
TDC2 = reshape(TDC4,7200,10);
```

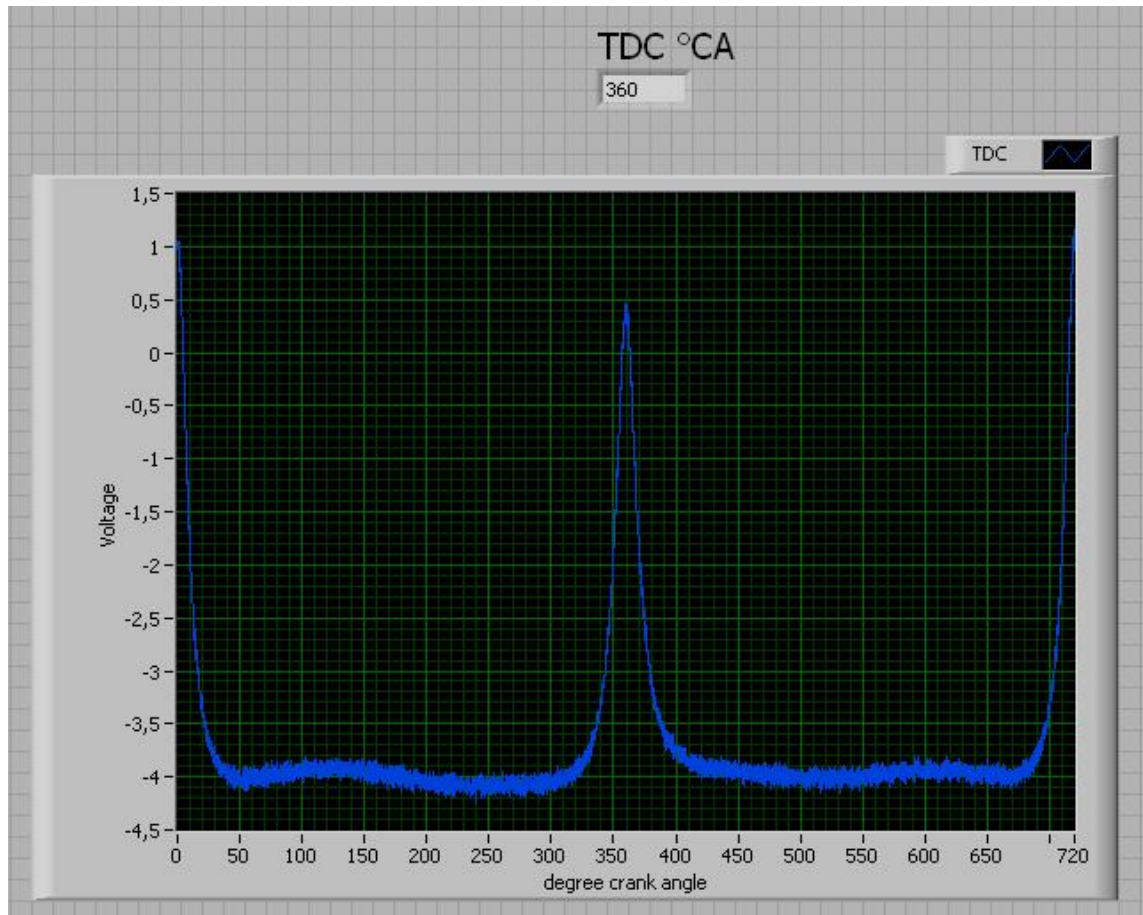


Figure E.4: Result labview program

## Bijlage F

# Configuration of Maihak Multor 610

In this appendix a detailed discription is given of how to configure the emission analyser Maihak Multor 610 in case of memory loss. This can occur after a power outage because of a broken EPROM.

F.1: Basic configuration after memory loss

F.2: Connect the emission analyzer to the PC

F.3: Upload the hex-file using HyperTerminal

F.4: Calibration using the correct calibration gases



## F.1 Basic configuration after memory loss

- After power outage the Multor 610 will return to its start screen because of the broken EPROM that used to preserve the settings of the emission analyzer. This start-up after reset is in German, but can be skipped for the biggest part.
- After power outage the Multor 610 will return to its start screen because of the broken EPROM that used to preserve the settings of the emission analyzer. This start-up after reset is in German, but can be skipped for the biggest part.
- After adding the components, the language can be set to Dutch or English in the Settings menu. This menu is reached by pushing the hidden button (above key 7).
- The emission analyzer is now ready to receive its configuration data via a PC.

## F.2 Connect the emission analyzer to the PC

- To load the configuration data to the Multor, a serial datalink has to be established.
- Disconnect the Multor's RS-232 connection to the area network that sends the measurement data to the data acquisition software (see Figure F.1).



Figure F.1: Standard connection of Multor 610 to DAQ

- Connect the analyzer to a COM gate of the PC using a solid serial cable. The gate of the Multor that is used to load the configuration data is not the one through which the measurement data is usually sent. (gate X4 instead of X3, see Figure F.2)

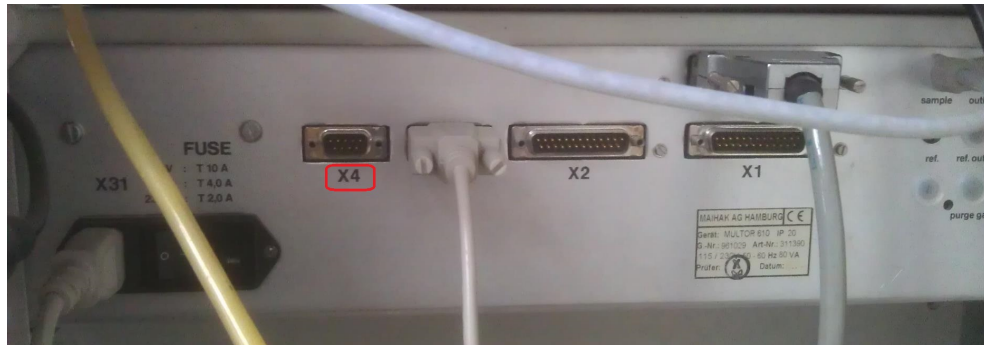


Figure F.2: Connection at the back of the Multor 610

### F.3 Upload the HEX-file using HyperTerminal

- Hyperterminal is a program that can be used to connect hardware through modems, null modem cables or a Winsock TCP/IP-connection. It is a piece of free software that can be easily downloaded. A screenshot of the user interface is shown in Figure F.3.

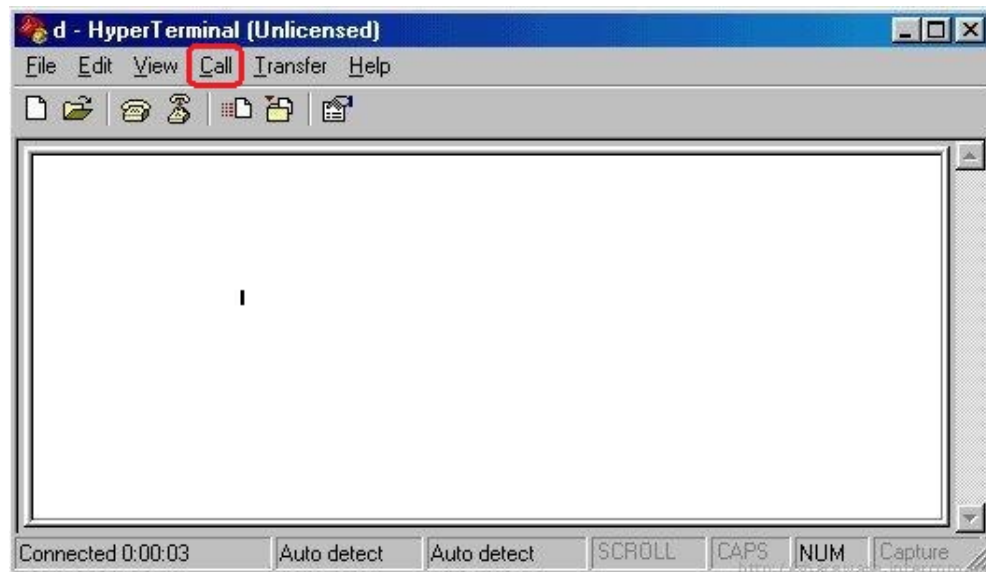


Figure F.3: User interface HyperTerminal

- Press 'Call' to establish a connection to the Multor.
- Enter a name for the connection.
- Choose the correct COM-gate in the dialog box 'Connect using:'.
- Insert the correct COM-gate settings. These can also be found in the Multor 610, in the 'Settings' menu. Usually they should be like this:

- Baud-rate: 9600
  - Data bits: 8
  - Parity: None
  - Stop bits: 1
  - Flow control: None
- Put the Multor 610 in receiving mode in the menu *79*. Use code *4657* to proceed to menu *29* and start receiving.
  - Send the file *961029.hex* from the PC to the emission analyzer by choosing Transfer - Send text file in Hyperterminal.
  - If everything was done correctly, the Multor will indicate progress of reception. Incorrect file transfer can result in different menu openings in the Multor or a lot of digit display on the Hyperterminal screen. This means the connection was not correctly established and a new attempt has to be made.

#### **F.4 Calibration using the correct calibration gases**

The emission analyzer is now ready to be calibrated. Look up the procedure *Uitlaatgascalibratie-Eng.docx* for specific guidelines.

Note: To avoid such memory loss in the future, check if the UPS is functioning properly.

Bijlage G

DVD

# Bibliografie

- [1] Graves, C., S. D. Ebbesen, M. Mogensen, en K. S. Lackner: *Sustainable hydrocarbon fuels by recycling CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O with renewable or nuclear energy*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15(1):1–23, 2011.
- [2] Council, World Energy: *2010 Survey of Energy Resources*. pagina 618, 2010.
- [3] Huylebroeck, T. en A. Van den Bulcke: *Prestaties en emissies bij het gebruik van alcoholmengsels in vonkonstekingsmotoren*. Masterscriptie Universiteit Gent, 2012.
- [4] Dierickx, J. en Y. Huyghebaert: *Alternatieve brandstoffen voor vonkonstekingsmotoren: optimalisatie van waterstofmotoren en opbouw van een methanolmotorproefstand*. Masterscriptie Universiteit Gent, 2010.
- [5] Sileghem, L. en M. Van De Ginste: *Methanol als brandstof voor moderne vonkonstekingsmotoren: Rendementstudie*. Masterscriptie Universiteit Gent, 2011.
- [6] Olah, G. A.: *Beyond Oil and Gas: The Methanol Economy*. Angewandte Chemie International Edition, 44(18):2636–2639, 2005.
- [7] Turner, J.W.G., R.J. Pearson, en R. Purvis: *GEM Ternary Blends: Removing the Biomass Limit by using Isostoichiometric Mixtures of Gasoline, Ethanol and Methanol*. SAE Technical Paper, 2012.
- [8] Weimer, T., K. Schaber, M. Specht, en A. Bandi: *Methanol from atmospheric carbon dioxide: A liquid zero emission fuel for the future*. Energy Conversion and Management, 37(6–8):1351–1356, 1996.
- [9] Vancoillie, J., J. Demuynck, L. Sileghem, M. Van De Ginste, en S. Verhelst: *Comparison of the renewable transportation fuels, hydrogen and methanol formed from hydrogen, with gasoline - Engine efficiency study*. International Journal of Hydrogen Energy, 37(12):9914–9924, 2012.
- [10] Zeman, F.: *Energy and material balance of CO<sub>2</sub> capture from ambient air*. Environmental science & technology, 41(21):7558–7563, 2007.

- [11] Pontzen, F., W. Liebner, V. Gronemann, M. Rothaemel, en B. Ahlers: *CO<sub>2</sub>-based methanol and DME – Efficient technologies for industrial scale production*. Catalysis Today, 171(1):242–250, 2011.
- [12] Fornero, E. L., D. L. Chiavassa, A. L. Bonivardi, en M. A. Baltanás: *CO<sub>2</sub> capture via catalytic hydrogenation to methanol: Thermodynamic limit vs. ‘kinetic limit’*. Catalysis Today, 172(1):158–165, 2011.
- [13] Martinez-Frias, Joel, Salvador M Aceves, en Daniel L Flowers: *Improving ethanol life cycle energy efficiency by direct utilization of wet ethanol in HCCI engines*. Transactions- American society of mechanical engineers journal of energy resources technology, 129(4):332, 2007.
- [14] Breaux, Baine B. en Sumanta Acharya: *The effect of elevated water content on swirl-stabilized ethanol/air flames*. Fuel, 2013.
- [15] Mack, J Hunter, Salvador M Aceves, en Robert W Dibble: *Demonstrating direct use of wet ethanol in a homogeneous charge compression ignition (HCCI) engine*. Energy, 34(6):782–787, 2009.
- [16] Costa, R. C. en J. R. Sodré: *Hydrous ethanol vs. gasoline-ethanol blend: Engine performance and emissions*. Fuel, 89(2):287–293, 2010.
- [17] Kiss, A. A. en R. M. Ignat: *Innovative single step bioethanol dehydration in an extractive dividing-wall column*. Separation and Purification Technology, 98(0):290–297, 2012.
- [18] Kiss, A. A. en D. J. P. C. Suszwalak: *Enhanced bioethanol dehydration by extractive and azeotropic distillation in dividing-wall columns*. Separation and Purification Technology, 86(0):70–78, 2012.
- [19] Jeong, J. S., H. Jeon, K. M. Ko, B. Chung, en G. W. Choi: *Production of anhydrous ethanol using various PSA (Pressure Swing Adsorption) processes in pilot plant*. Renewable Energy, 42(0):41–45, 2012.
- [20] Jamal, Y. en M. L. Wyszynski: *On-board generation of hydrogen-rich gaseous fuels - a review*. International Journal of Hydrogen Energy, 19(7):557–572, 1994.
- [21] Brown, F. L.: *A comparative study of fuels for on-board hydrogen production for fuelcell-powered automobiles*. International Journal of Hydrogen Energy, 26(4):381–397, 2001.
- [22] Kirillov, V. A., V. A. Sobyenin, N. A. Kuzin, O. F. Brizitski, en V. Ya Terentiev: *Synthesis gas generation on-board a vehicle: Development and results of testing*. International Journal of Hydrogen Energy, 37(21):16359–16366, 2012.

- [23] Tsolakis, A. en A. Megaritis: *Partially premixed charge compression ignition engine with on-board production by exhaust gas fuel reforming of diesel and biodiesel*. International Journal of Hydrogen Energy, 30(7):731–745, 2005.
- [24] Wheeler, J, R Stein, D Morgenstern, en E Sall: *Low-Temperature Ethanol Reforming: A Multi-Cylinder Engine Demonstration*. SAE Technical paper, pagina's 01–0142, 2011.
- [25] Bromberg, L., D. R. Cohn, A. Rabinovich, J. E. Surma, en J. Virden: *Compact plasmatron-boosted hydrogen generation technology for vehicular applications*. International Journal of Hydrogen Energy, 24(4):341–350, 1999.
- [26] Bromberg, L., D. R. Cohn, A. Rabinovich, en J. Heywood: *Emissions reductions using hydrogen from plasmatron fuel converters*. International Journal of Hydrogen Energy, 26(10):1115–1121, 2001.
- [27] Bromberg, L., K. Hadidi, D.R. Cohn, en Massachusetts Institute of Technology. Plasma Science Fusion Center: *Plasmatron Reformation of Renewable Fuels*. 2005.
- [28] Horng, R. F., Y. P. Chang, en C. L. Chung: *Carbon deposit growth on the electrodes of a plasma converter in the generation of hydrogen from methane*. International Journal of Hydrogen Energy, 31:2040–2051, 2006.
- [29] Petitpas, G., J. D. Rollier, A. Darmon, J. Gonzalez-Aguilar, R. Metkemeijer, en L. Fulcheri: *A comparative study of non-thermal plasma assisted reforming technologies*. International Journal of Hydrogen Energy, 32:2848–2867, 2007.
- [30] Wallner, T., A. M. Ickes, en K. Lawyer: *Analytical assessment of C2-C8 alcohols as spark-ignition engine fuels*. FISITA, 2012.
- [31] Aleme, Helga G., Letícia M. Costa, en Paulo J. S. Barbeira: *Determination of ethanol and specific gravity in gasoline by distillation curves and multivariate analysis*. Talanta, 78(4–5):1422–1428, 2009.
- [32] Hallett, W. L. H. en S. Beauchamp-Kiss: *Evaporation of single droplets of ethanol-fuel oil mixtures*. Fuel, 89(9):2496–2504, 2010.
- [33] Andersen, V. F., J. E. Anderson, T. J. Wallington, S. A. Mueller, en O. J. Nielsen: *Distillation Curves for Alcohol-Gasoline Blends*. Energy & Fuels, 24(4):2683–2691, 2010.
- [34] Vakili-Nezhaad, G. R., H. Modarress, en G. A. Mansoori: *Continuous thermodynamics of petroleum fluids fractions*. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 40(5):431–435, 2001.

- [35] Pumphrey, J. A., J. I. Brand, en W. A. Scheller: *Vapour pressure measurements and predictions for alcohol-gasoline blends*. Fuel, 79(11):1405–1411, 2000.
- [36] Jin, Chao, Mingfa Yao, Haifeng Liu, Chia fon F. Lee, en Jing Ji: *Progress in the production and application of n-butanol as a biofuel*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15(8):4080–4106, 2011.
- [37] Farkade, H.S. en A.P. Pathre: *Experimental investigation of methanol, ethanol and butanol blends with gasoline on SI engine*. International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, 2(4), 2012.
- [38] Broustail, G., F. Halter, P. Seers, G. Moréac, en C. Mounaim-Rousselle: *Comparison of regulated and non-regulated pollutants with iso-octane/butanol and iso-octane/ethanol blends in a port-fuel injection Spark-Ignition engine*. Fuel, 94(0):251–261, 2012.
- [39] Dernothe, J., C. Mounaim-Rousselle, F. Halter, en P. Seers: *Evaluation of Butanol-Gasoline Blends in a Port Fuel-injection, Spark-Ignition Engine*. Oil Gas Sci. Technol. - Rev. IFP, 65(2):345–351, 2010.
- [40] Wallner, T., S. A. Miers, en S. McConnell: *A comparison of ethanol and butanol as oxygenates using a direct-injection, spark-ignition (DISI) engine*. 2009. (Energy Systems).
- [41] Wallner, T. en R. Frazee: *Study of Regulated and Non-Regulated Emissions from Combustion of Gasoline, Alcohol Fuels and their Blends in a DI-SI Engine*. SAE Technical paper, 2010.
- [42] Harvey, B. G. en H. A. Meylemans: *The role of butanol in the development of sustainable fuel technologies*. 2010.
- [43] Turner, J.W.G., R.J. Pearson, en R. Purvis: *GEM Ternary Blends: Investigations into Exhaust Emissions, Blend Properties and Octane Numbers*. SAE Technical Paper, 2012.
- [44] Turner, J.W.G., R.J. Pearson, en R. Purvis: *GEM Ternary Blends: An Initial Investigation into Fuel Spray and Combustion Characteristics in a Direct-Injected Spark-Ignition Optical Engine using Mie Imaging*. SAE Technical Paper, 2012.
- [45] Anderson, J. E., D. M. DiCicco, J. M. Ginder, U. Kramer, T. G. Leone, H. E. Raney-Pablo, en T. J. Wallington: *High octane number ethanol-gasoline blends: Quantifying the potential benefits in the United States*. Fuel, 97(0):585–594, 2012.



- [46] Qi, D. H., S. Q. Liu, C. H. Zhang, en Y. Z. Bian: *Properties, performance, and emissions of methanol-gasoline blends in a spark ignition engine*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 219(3):405–412, 2005.
- [47] Skinner, W. en H. Viljoen: *Corrosion of carburettor materials*. Corrosion and Coatings SA, 1981.
- [48] Binder, J.: *New generation of automotive sensors to fulfil the requirements of fuel economy and emission control*. Sensors and Actuators A: Physical, 31:60–67, 1992.
- [49] Hofmann, T., F. Beckmann, S. Michaelis, J. Zacheja, J. Binder, en S. Tagliante: *Comparison of a conventional with an advanced micromachined flexible-fuel sensor*. Sensors and Actuators A: Physical, 61(1–3):319–322, 1997.
- [50] Benvenho, A. R. V., R. W. C. Li, en J. Gruber: *Polymeric electronic gas sensor for determining alcohol content in automotive fuels*. Sensors and Actuators B: Chemical, 136(1):173–176, 2009.
- [51] Beckers, N. A., M. T. Taschuk, en M. J. Brett: *Selective Room Temperature Nanostructured Thin Film Alcohol Sensor as a Virtual Sensor Array*. Sensors and Actuators B: Chemical, 2012.
- [52] Lunati, A en O Galtier: *Determination of mixture of methanol and ethanol blends in gasoline fuels using a miniaturized NIR Flex Fuel sensor*. SAE Technical paper, pagina's 01–0142, 2011.
- [53] Ahn, K., A.G. Stefanopoulou, en M. Jankovic: *Estimation of ethanol content in flex-fuel vehicles using an exhaust gas oxygen sensor: Model, tuning and sensitivity*. In *Proceedings of Dynamic Systems and Control Conference (DSCC08)*, ser. Paper TuAT5, volume 3.
- [54] Ahn, K., A.G. Stefanopoulou, en M. Jankovic: *Tolerant ethanol estimation in flex-fuel vehicles during MAF sensor drifts*. In *Proceedings of ASME 2nd Annual Dynamic Systems and Control Conference*, pagina's 12–14.
- [55] Wang, D. Y.: *Real-time dynamics of amperometric exhaust oxygen sensors*. Sensors and Actuators B: Chemical, 126(2):551–556, 2007.
- [56] Nazarpour, S., C. López-Gándara, C. Zamani, F. M. Ramos, en Albert Cirera: *Modification of the oxygen diffusivity in limiting current oxygen sensors*. Sensors and Actuators B: Chemical, 155(2):489–499, 2011.
- [57] Oliverio, N.H., L. Jiang, H. Yilmaz, en A.G. Stefanopoulou: *Modeling the effect of fuel ethanol concentration on cylinder pressure evolution in direct-injection*

- flex-fuel engines*. In *American Control Conference, 2009. ACC'09.*, pagina's 2037–2044. IEEE.
- [58] Batteh, J.J. en E.W. Curtis: *Modeling transient fuel effects with alternative fuels*. SAE Technical Paper, pagina's 01–1127, 2005.
- [59] Andersson, Ingemar: *Cylinder pressure and ionization current modeling for spark ignited engines*. Linkopings Universitet, SE, 581:83, 2002.
- [60] Eriksson, L. en L. Nielsen: *Ionization current interpretation for ignition control in internal combustion engines*. *Control Engineering Practice*, 5(8):1107–1113, 1997.
- [61] Daniels, C.F.: *Mass fraction burned and pressure estimation through spark plug ion sensing*, 2000.
- [62] Mehresh, P., J. Souder, D. Flowers, U. Riedel, en R. W. Dibble: *Combustion timing in HCCI engines determined by ion-sensor: experimental and kinetic modeling*. *Proceedings of the Combustion Institute*, 30(2):2701–2709, 2005.
- [63] Rivara, N., P. B. Dickinson, en A. T. Shenton: *A transient virtual-AFR sensor using the in-cylinder ion current signal*. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 23(5):1672–1682, 2009.
- [64] Park, C., S. Kim, H. Kim, en Y. Moriyoshi: *Stratified lean combustion characteristics of a spray-guided combustion system in a gasoline direct injection engine*. *Energy*, 41(1):401–407, 2012.
- [65] Zhao, F., M.C. Lai, en D.L. Harrington: *Automotive spark-ignited direct-injection gasoline engines*. *Progress in energy and combustion science*, 25(5):437–562, 1999.
- [66] Turner, D., H. Xu, R. F. Cracknell, V. Natarajan, en X. Chen: *Combustion performance of bio-ethanol at various blend ratios in a gasoline direct injection engine*. *Fuel*, 90(5):1999–2006, 2011.
- [67] Chen, L., R. Stone, en D. Richardson: *A study of mixture preparation and PM emissions using a direct injection engine fuelled with stoichiometric gasoline/ethanol blends*. *Fuel*, 96:120–130, 2012.
- [68] Sementa, P., B. M. Vaglieco, en F. Catapano: *Thermodynamic and optical characterizations of a high performance GDI engine operating in homogeneous and stratified charge mixture conditions fueled with gasoline and bio-ethanol*. *Fuel*, 96(0):204–219, 2012.

- [69] Gong, C., K. Huang, Y. Chen, J. Jia, Y. Su, en X. Liu: *Cycle-by-cycle combustion variation in a DISI engine fueled with methanol*. Fuel, 90(8):2817–2819, 2011.
- [70] Gong, C. M., K. Huang, J. L. Jia, Y. Su, Q. Gao, en X. J. Liu: *Improvement of fuel economy of a direct-injection spark-ignition methanol engine under light loads*. Fuel, 90(5):1826–1832, 2011.
- [71] Gong, C. M., K. Huang, J. L. Jia, Y. Su, Q. Gao, en X. J. Liu: *Regulated emissions from a direct-injection spark-ignition methanol engine*. Energy, 36(5):3379–3387, 2011.
- [72] Liang, B., Y. Ge, J. Tan, X. Han, L. Gao, L. Hao, W. Ye, en P. Dai: *Comparison of PM emissions from a gasoline direct injected (GDI) vehicle and a port fuel injected (PFI) vehicle measured by electrical low pressure impactor (ELPI) with two fuels: gasoline and M15 methanol gasoline*. Journal of Aerosol Science.
- [73] Mužíková, Z., M. Pospíšil, en G. Šebor: *Volatility and phase stability of petrol blends with ethanol*. Fuel, 88(8):1351–1356, 2009.
- [74] French, R. en P. Malone: *Phase equilibria of ethanol fuel blends*. Fluid Phase Equilibria, 228–229(0):27–40, 2005.
- [75] Niven, R. K.: *Ethanol in gasoline: environmental impacts and sustainability review article*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 9(6):535–555, 2005.
- [76] Osten, D. W. en N. J. Sell: *Methanol-gasoline blends: blending agents to prevent phase separation*. Fuel, 62(3):268–270, 1983.
- [77] Letcher, T. M., C. Heyward, S. Wootton, en B. Shuttleworth: *Ternary phase diagrams for gasoline-water-alcohol mixtures*. Fuel, 65(7):891–894, 1986.
- [78] Whims, J.: *Pipeline Considerations for Ethanol*. 2002.
- [79] RFA: *Best Practices for Rail Transport of Fuel Ethanol*. 2009.
- [80] Institute, Methanol: *Methanol Gasoline Blends*. 2010.
- [81] Baena, L., F. Jaramillo, en J. A. Calderon: *Aggressiveness of a 20% bioethanol 80% gasoline mixture on autoparts: II Behavior of polymeric materials*. Fuel, 95(0):312–319, 2012.
- [82] Baena, L. M., M. Gomez, en J. A. Calderon: *Aggressiveness of a 20% bioethanol–80% gasoline mixture on autoparts: I behavior of metallic materials and evaluation of their electrochemical properties*. Fuel, 95(0):320–328, 2012.

- [83] Yoo, Y. H., I. J. Park, J. G. Kim, D. H. Kwak, en W. S. Ji: *Corrosion characteristics of aluminum alloy in bio-ethanol blended gasoline fuel: Part 1. The corrosion properties of aluminum alloy in high temperature fuels*. Fuel, 90(3):1208–1214, 2011.
- [84] Burbacher, T., D. Shen, K. Grant, L. Sheppard, D. Damian, S. Ellis, en N. Liberato: *Reproductive and offspring developmental effects following maternal inhalation exposure to methanol in nonhuman primates*. Research report (Health Effects Institute), (89):i–ii, 1–117; discussion 119–33, 1999.
- [85] Williams, R. L., F. Lipari, en R. A. Potter: *Formaldehyde, Methanol and Hydrocarbon Emissions from Methanol-fueled Cars*. Journal of the Air & Waste Management Association, 40(5):747–756, 1990.
- [86] Williams, P. R. D., C. A. Cushing, en P. J. Sheehan: *Data Available for Evaluating the Risks and Benefits of MTBE and Ethanol as Alternative Fuel Oxygenates*. Risk Analysis, 23(5):1085–1115, 2003.
- [87] McCabe, R. W. en P. J. Mitchell: *Exhaust-catalyst development for methanol-fueled vehicles: III. Formaldehyde oxidation*. Applied Catalysis, 44(0):73–93, 1988.
- [88] Zhang, C., H. He, en K. Tanaka: *Catalytic performance and mechanism of a Pt/TiO<sub>2</sub> catalyst for the oxidation of formaldehyde at room temperature*. Applied Catalysis B: Environmental, 65(1–2):37–43, 2006.
- [89] Saffman, Mark: *Parametric studies of a side wall quench layer*. Combustion and flame, 55(2):141–159, 1984.
- [90] Reynvoet, T.: *Uitwerken van een waterstofdemonstratie op een multifuel-motorenteststand*. Masterscriptie Katholieke Hogeschool Gent, 2012.
- [91] Johansen, T. en J. Schramm: *Low-Temperature Miscibility of Ethanol-Gasoline-Water Blends in Flex Fuel Applications*. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 31(18):1634–1645, 2009.
- [92] Pearson, R.J., J.W.G. Turner, A. Bell, S. de Goede, en C. Woolard: *Isostoichiometric fuel blends: characterization of physico-chemical properties for mixtures of gasoline, ethanol, methanol, and water*. in preparation for submission to Proc. Instn Mech. Engrs Journal of Automotive Engineering, Part D.
- [93] Cheng, W.K., D. Hamrin, J.B. Heywood, S. Hochgreb, K. Min, en M. Norris: *An overview of hydrocarbon emissions mechanisms in spark-ignition engines*. 1993.

- [94] Serras-Pereira, J., P. G. Aleiferis, en D. Richardson: *Imaging and heat flux measurements of wall impinging sprays of hydrocarbons and alcohols in a direct-injection spark-ignition engine*. Fuel, 91(1):264–297, 2012.
- [95] Arters, D.C. en M.J. Macduff: *The effect on vehicle performance of injector deposits in a direct injection gasoline engine*. SAE Technical Paper, pagina's 01–2021, 2000.
- [96] Fan, Q. en L. Li: *Study on first-cycle combustion and emissions during cold start in a TSDI gasoline engine*. Fuel.
- [97] Daniel, R., H. Xu, C. Wang, D. Richardson, en S. Shuai: *Combustion performance of 2,5-dimethylfuran blends using dual-injection compared to direct-injection in a SI engine*. Applied Energy, 98(0):59–68, 2012.
- [98] Sileghem, Louis, Jeroen Vancoillie, Joachim Demuynck, Jonas Galle, en Sebastian Verhelst: *Alternative Fuels for Spark-Ignition Engines: Mixing Rules for the Laminar Burning Velocity of Gasoline-Alcohol Blends*. Energy & Fuels, 26(8):4721–4727, 2012.

