

# Diepgaande Industrie- analyse voor het Testen en Verbeteren van Indicatoren voor Technologische Radicaliteit

Een Onderzoek binnen het Technologische Veld van  
Verbrandingsmotoren

**Daan Markey**

R0234963

Masterproef aangeboden tot  
het behalen van de graad

MASTER IN HET MANAGEMENT

Promotor: Prof. Dr. Reinhilde Veugelaers  
Werkleider: Dennis Verhoeven

Academiejaar 2012-2013





# **DIEPGAANDE INDUSTRIEANALYSE VOOR HET TESTEN EN VERBETEREN VAN INDICATOREN VOOR TECHNOLOGISCHE RADICALITEIT**

Daan Markey<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Master student in het Management, KULeuven – Fac. Economie en Bedrijfswetenschappen, Naamsestraat 69, 3000 Leuven

Promotor: Prof.dr. Reinhilde Veugelers  
KULeuven – Fac. Economie en Bedrijfswetenschappen, Naamsestraat 69, 3000 Leuven

Copromotor: Dennis Verhoeven  
KULeuven – Fac. Economie en Bedrijfswetenschappen, Naamsestraat 69, 3000 Leuven, Dennis.Verhoeven@kuleuven.be

## **ABSTRACT**

Deze paper onderzoekt de kwaliteit van indicatoren voor het vinden van technologische radicaliteit. De indicatoren zoeken in patentdata, van 1980 tot 2010, naar origine, functionaliteit en impact van het patent. Alle patenten worden onderverdeeld in klassen volgens het International Patent Classification (IPC) systeem. Patenten scoren op de indicatoren door nieuwe klassencombinaties te bezitten. Hierdoor worden zij als een radicale innovatie beschouwd. Om deze theorie te testen is een technologisch veld afgebakend waarin alle innovaties extern en in detail zijn onderzocht. Het gekozen technologische veld is verbrandingsmotoren. De innovaties binnen dit veld worden besproken en beoordeeld op hun origine, functionaliteit en impact zonder gebruik te maken van de indicatoren. Het resultaat hiervan is een overzicht van alle innovaties die de indicatoren zouden moeten opmerken binnen dit technologische veld. Het doel van deze paper is een verificatie en optimalisatie van de indicatoren. Wanneer de resultaten van de indicatoren en de verwachtingen niet overeen komen wordt in detail onderzocht wat de reden hiervoor is. Uit dit onderzoek werden enkele voorstellen gedaan om de indicatoren beter te laten functioneren. Het resultaat is dat de indicator voor nieuwe functionaliteit mogelijk beter zal functioneren wanneer ze wordt gebruikt op een niveau tussen het 4-digit en het 6-digit niveau van het IPC systeem. Voor de indicator voor nieuwe origine wordt voorgesteld om te werken op het 6-digit niveau waarbij de klassen met veel subniveaus verder worden gesplitst. Patenten met de zelfde inhoud maar uitgegeven in een ander land worden niet steeds consequent en eenduidig in IPC klassen ingedeeld. Daarom werd voorgesteld om klassencombinaties tussen deze patenten toe te laten. Tot slot kan het probleem met valse scores opgelost worden door een lijst met irrelevante patentklassen op te stellen welke niet meer zullen scoren op de indicatoren.

## **Trefwoorden**

radicale innovatie, technologische radicaliteit, patentindicatoren, verbrandingsmotoren

## 1 INLEIDING

Om radicale innovaties te kunnen onderzoeken moeten eerst enkele definities worden uitwerkt. Over de jaren heen zijn er meerdere definities opgesteld waarbij innovatie telkens op een andere manier voorgesteld en gemeten wordt [1]. Innovatie kan gedefinieerd worden als de verzameling van alle vernieuwingen in de bestaande technologie. Maar doordat er geen algemene betekenis bestaat van wat technologie is doorheen de verschillende literatuur, ligt het begrip innovatie ook niet vast. Innovatie of evolutie in de technologie kan niet zomaar uit het niets ontstaan. We kunnen stellen dat nieuwe technologieën ontstaan uit de combinaties van oude technologieën. Op deze manier is elke technologie een bouwsteen voor toekomstige technologie en bestaat deze op zich uit kleinere bouwstenen uit het verleden. Sommige technologieën schijnen plots uit het niets te ontstaan. Deze ontwikkeling beschouwen we als radicale innovatie. Op het eerste zicht lijkt deze gebeurtenis niet te passen in de theorie dat alle innovaties voortvloeien uit de combinaties van bestaande technologieën. Maar deze radicale innovatie moet, zoals elke andere nieuwe technologie, ook gebaseerd zijn op bestaande kennis. Dit leidt tot de gedachte dat er combinaties bestaan die niet voor de hand liggen en welke per toeval of met voorbedachte raden ontdekt en uitgewerkt worden.

Een technologie is een middel voor het bereiken van een doel voor de mens. Om dit doel te bereiken maakt elke technologie gebruik van één of meerdere fenomenen of waarheden in de natuur. Een technologie is een benut fenomeen voor het bereiken van een doel. Het is de wetenschap die deze fenomenen ontdekt en onderzoekt. Een ontdekking van een fenomeen heeft vaak een lawine van nieuwe technologie tot gevolg, denk maar aan de ontdekking van het elektrische fenomeen. Toch kunnen we niet stellen dat de evolutie van technologie rechtstreeks voortvloeit uit de nieuwe ontdekkingen in de wetenschap. Vaak is het niet meteen duidelijk welke doelen een nieuw fenomeen zal kunnen vervullen. Ook kunnen er fenomenen worden ontdekt zonder enige toepassingen. Het verschil tussen wetenschap en technologie is dat wetenschap fenomenen ontdekt en onderzoekt terwijl technologie deze toepast.

Het is nu duidelijk dat technologie niet kan bestaan zonder fenomenen en dat fenomenen op zich geen nut hebben voor de mens. Met het voorgaande in het achterhoofd kunnen we nu bespreken hoe nieuwe technologie tot stand komt. Dit gebeurt door een doel te linken met een fenomeen. Een nieuwe technologie ontstaat ofwel door een nieuw doel te verwezenlijken met een bestaand fenomeen, of door een nieuw fenomeen te benutten voor een bestaand doel, of beide. Deze vereenvoudigde voorstelling van innovaties moeten we zeer breed bekijken. Zo is het mogelijk dat niet één link, maar meerdere linken ontstaan tussen fenomenen en doelen. Wanneer er een link wordt gemaakt welke nooit eerder werd gelegd, kunnen we spreken van een nieuwe uitvinding. Deze innovaties leiden tot nieuwe functionele

mogelijkheden. En ze bevatten het potentieel om nieuwe toepassingen te creëren, zelfs binnen een ander technologisch veld. Voor een grondigere uiteenzetting van deze gedachtegang verwijs ik u door naar het werk van B. W. Athur [2].

Om de radicaliteit van een innovatie te kunnen beoordelen werden er drie technologische dimensies voorgesteld. De dimensies zijn origine, functionaliteit en impact. In de eerste dimensie wordt de origine van de nieuwe innovatie bekeken. Hierbij wordt onderzocht of de wetenschappelijke principes/fenomenen waarop de innovatie is gebaseerd al eerder voorkomen in andere technologieën. Dit voor zowel technologieën binnen als buiten het technologische veld waarin de desbetreffende innovatie zich bevindt. Vervolgens wordt ook de origine van de gebruikte wetenschappelijke principes/fenomenen beoordeeld voor de bepaalde toepassing. De tweede dimensie is de functionaliteit die de innovatie toevoegt. De nieuwe componenten van de innovatie worden beoordeeld alsook de prestaties ervan ten opzichte van de vorige technologieën. De nieuwe functies van de innovatie zijn belangrijk in deze dimensie. In de laatste dimensie komt de impact van de innovatie aan bod. Er wordt nagegaan of de innovatie aanleiding gaf tot nieuwe toekomstige uitvindingen welke drastische verbeteringen teweegbrengen in het technologische veld. Ook buiten het technologische veld van de innovatie wordt onderzocht of ze technologische progressie heeft voortgebracht. Tot slot wordt er nagegaan of de innovatie oudere technologieën overbodig heeft gemaakt of achterhaalt.

Deze paper situeert zich binnen het onderzoeksproject aan de Katholieke Universiteit Leuven omtrent metingen naar technologische radicaliteit. Dit onderzoeksproject gebruikt patentdata voor het vinden van deze innovaties. Patentdata is een zeer rijke bron aan informatie over nieuwe uitvindingen. Naast de algemene omschrijving en tekeningen bevat het gegevens over geciteerde werken. Alle patenten worden geclassificeerd volgens de International Patent Classification (IPC). Dit classificatiesysteem deelt de technologie op in 8 verschillende klassen met elk gemiddeld 70.000 subdivisies [3]. Er zijn drie indicatoren opgesteld om de patenten te beoordelen op de drie technologische dimensies; origine, functionaliteit en impact. De eerste indicator meet de nieuwe origine van het patent door de citaties naar eerdere werken te gebruiken. Wanneer er een citatie gebeurt naar een patent van een andere klasse, en deze twee klassen zijn nooit eerder gekoppeld via een citatie, dan scoort het patent op de indicator voor nieuwe origine. De tweede indicator meet de nieuwe functionaliteit. Patenten kunnen onderverdeeld worden in verschillende klassen. Wanneer een patent behoort tot twee klassen welke nog nooit eerder zijn gecombineerd, dan scoort het patent op nieuwe functionaliteit. De laatste indicator meet de nieuwe impact van de uitvinding. Dit gebeurt op een zelfde manier als de indicator voor nieuwe origine, enkel wordt er nu gekeken naar voorwaartse

citaties. Dit zijn citaties van een nieuwer patent die gebeuren naar het oudere patent dat onderzocht wordt. Met alle indicatoren samen wordt een algemene conclusie gemaakt of dit patent een radicale innovatie is [4].

Deze paper begint met de beschrijving van de methoden die gebruikt werden om de innovaties binnen het technologische veld van verbrandingsmotoren te mappen. Hierna volgt een overzicht van alle gevonden innovaties. Deze worden individueel kort besproken en beoordeeld op de drie technologische dimensies. Vervolgens worden de resultaten van de indicatoren met de verwachte resultaten vergeleken en besproken. Tot slot werden enkele opmerkingen en verbeteringen voor de indicatoren voorgesteld.

## 2 METHODOLOGIE

Deze paragraaf verduidelijkt de gevolgde methoden van het onderzoek. Het doel is om alle innovaties binnen het technologische veld van verbrandingsmotoren te mappen. Dit enkel voor uitvindingen vanaf 1980 tot 2010. Omdat er enkel patentdata van deze periode gebruikt worden in het onderzoek naar innovaties van de Katholieke Universiteit Leuven. De eerste stap is het technologische veld afbakenen waarop het onderzoek zal gebeuren. Alle machines waarin een brandstof wordt verbrand in een verbrandingskamer met als doel deze energie om te zetten in bewegingsenergie behoren tot het technologische veld van verbrandingsmotoren. Enkele bekende voorbeelden zijn de zuigermotor (de benzine- en dieselmotor) en de rotatiemotor (wankelmotor). Elke technologie bestaat uit bouwstenen van oudere technologieën. Dit leidde tot de tweede stap, namelijk alle bouwstenen van de verbrandingsmotoren identificeren. Elk onderdeel dat gebruikt werd in 2010 en nog niet in 1980 duidt op een eerste groep van innovaties. Vervolgens wordt de evolutie van elke innovatie in deze groep verder in detail onderzocht. Het spreekt voor zich dat deze eerste groep nog niet volledig is. Denk maar aan de innovaties die opgekomen en al vervangen zijn door anderen in 2010. Ook bestaan er innovaties die in 2010 nog geen volledige impact hebben gerealiseerd. Om deze meer recentere evoluties te mappen werd gebruik gemaakt van het wetenschappelijk tijdschrift *Engine Technology International*. In dit tijdschrift verschijnen alle nieuwe ontwikkelingen op het vlak van motoren. *Engine Technology International* is de meest gelezen publicatie in de motor industrie, gewijd aan innovaties in verbrandingsmotoren en hybride technologieën [5].

Nadat alle innovaties individueel zijn uitgewerkt is de laatste stap validatie. Dit gebeurt via enkele wetenschappelijke papers. De eerste paper, *Automotive component innovation: development and diffusion of engine management Technologies* [6], verscheen in het wetenschappelijke tijdschrift *Technovation*. Dit tijdschrift omvat alle facetten van technologische innovatie en publiceert enkel collegiaal getoetste artikels [7]. De paper geeft een overzicht van de mechanische innovaties met

betrekking tot het motor management systeem. Een tweede paper, *Overview of automotive sensors* [8], geeft een overzicht van alle elektronische componenten in motoren. Deze paper verscheen in het wetenschappelijk tijdschrift *IEEE sensors journal*. Tot slot zijn er nog twee papers gebruikt welke te maken hebben met de emissiereductie van verbrandingsmotoren. Dit omdat de emissiewetgeving enorm is verstrengd in de periode 1980 tot 2010. De eerste, *Reducing automotive emissions—The potentials of combustion engine technologies and the power of policy* [9], gaat over de algemene innovaties die hebben plaats gevonden voor de reductie van uitlaatgassen. De tweede, *Diesel engine development in view of reduced emission standards* [10], gaat specifiek over de innovaties binnen dieselmotoren. Beide papers zijn gepubliceerd in een wetenschappelijk tijdschrift. Al deze papers samen geven een goede validatie van onze lijst met innovaties. Hierdoor kunnen we er zeker van zijn dat geen enkele belangrijke innovatie over het hoofd werd gezien.

## 3 OVERZICHT INNOVATIES

Deze paragraaf geeft een overzicht van de innovaties binnen het technologische veld van verbrandingsmotoren in de periode van 1980 tot 2010. De innovaties worden onderverdeeld in elektronische en mechanische technologieën. Elke innovatie wordt eerst kort besproken. Vervolgens worden ze beoordeeld op hun origine, functionaliteit en impact.

### 3.1 Elektronische technologie

Het gebruik van elektronica in motoren is begonnen in 1970. Hoewel er reeds in de jaren 60 enorm veel kennis bestond rond elektronica, zoals radio en computers, had deze technologie nog geen toepassingen binnen het veld van motoren. Er zijn twee grote drijfveren die het gebruik van elektronische componenten binnen motoren hebben geïnitieerd in 1970. Ten eerste waren er de verstrengde overheidsmaatregelen over uitlaatgassen en brandstofverbruik die een betere controle van de motoren eisten. Ten tweede was er een enorme vooruitgang geboekt binnen de ontwikkeling van elektronische componenten welke hierdoor beter en eenvoudiger toepasbaar werden in andere domeinen.

Enkele elektronische toepassingen zijn onder meer de digitale motor controle, controle van de uitlaatgassen en de elektronische ontsteking systemen. Al deze technologieën vereisen op zich weer een hele reeks elektronische sensoren en actuatoren. Deze taken van de elektronica werden voorheen uitgevoerd door een mechanische of pneumatische tegenhanger. In het begin van de jaren '80 zijn de meest voor de hand liggende mechanische en pneumatische systemen vervangen door elektronische systemen. Na 1981 zijn meer geavanceerdere elektronische innovaties ontstaan in het domein van motoren. Enkele voorbeelden zijn de klopsensor, sequentiële brandstofinjectie, enz. [11]. Hieronder volgt een overzicht en een individuele bespreking van deze innovaties.

### 3.1.1 *Klopsensor*

In uitzonderlijke omstandigheden kan een motor beginnen kloppen, ook bekend als pingelen van de motor. Een te snelle stijging van de druk in de cilinders is de oorzaak hiervan en het kan verholpen worden door een vertraging in de ontstekingscyclus. Als het pingelen niet tijdig wordt opgemerkt zal dit destructieve gevolgen hebben voor de motor. Tegenwoordig heeft elke verbrandingsmotor een interne regellus met klopsensor.

We kunnen drie soorten klopsensors onderscheiden die elk steunen op een ander natuurlijk fenomeen. De eerste is de piëzo-elektrische/restrictieve klopsensor, uitgevonden in 1981. Het piëzo-elektrische/restrictieve effect, waarop deze techniek steunt, is het verschijnsel waarbij een kristal onder druk een elektrische spanning genereert of van weerstand verandert[12]. Een tweede klopsensor maakt gebruik van een optische sensor die rechtstreeks in de verbrandingskamer wordt geplaatst. Het optische signaal wordt vervolgens in een nuttig elektrisch signaal omgezet door een opto-elektrische transducer[13]. De derde en laatste klopsensor is de magnetostrictieve klopsensor. Magnetostrictie is het fenomeen waarbij de magnetische sterkte van een materiaal afhankelijk is van de stress waaronder het materiaal zich bevindt. Bij het pingelen van de motor zal de magnetostrictieve staaf een magnetisch veld beïnvloeden, deze fluxverandering zorgt op zijn beurt voor een spanningsverandering in een spoel. De klopp van de motor kan gedetecteerd worden aan de hand van deze spanning [14].

**Origine.** Het piëzo-elektrische/restrictieve fenomeen werd reeds eerder binnen het technologische domein van motoren gebruikt om onder andere drukken te meten in het in- en uitlaatspruitstuk, in de turbocompressor en in de brandstoftank [8]. Het wetenschappelijke principe van piëzo-elektrische/restrictieve sensors is een goed gekend fenomeen en wordt dan ook toegepast in zeer veel verschillende technologische velden. Het toepassen van deze technologie voor het meten van pingelen van de motor was hierdoor een logische stap.

De uitvinding van de optische klopsensor gebeurde in 1982 en was toen de eerste keer dat er gebruik werd gemaakt van optische technologie binnen het veld van motoren [13]. Het idee om optische signalen te gebruiken voor het detecteren van klopp ligt minder voor de hand en is daarom een voorbeeld van 'out of the box thinking'.

De derde klopsensor welke gebruik maakt van het magnetostrictieve principe is één van de eerste toepassingen van dit principe binnen het technologische veld van motoren. Deze klopsensor werd ontworpen rond 1981[15]. Het magnetostrictieve principe wordt ook gebruikt in ander technologische velden zoals lange afstand inspecties van pijpleidingen en bij applicaties voor de fundamentele studie naar golf voortplantingen[16].

**Functionaliteit.** De drie klopsensors gebruiken elk nieuwe componenten binnen het technologische veld van motoren. Enkele voorbeelden van deze nieuwe componenten zijn: een piëzo-elektrische/restrictief kristal, een optische sensor/transducer en een magnetostrictieve staaf. Al deze componenten worden gebruikt volgens hun normale traditionele werking.

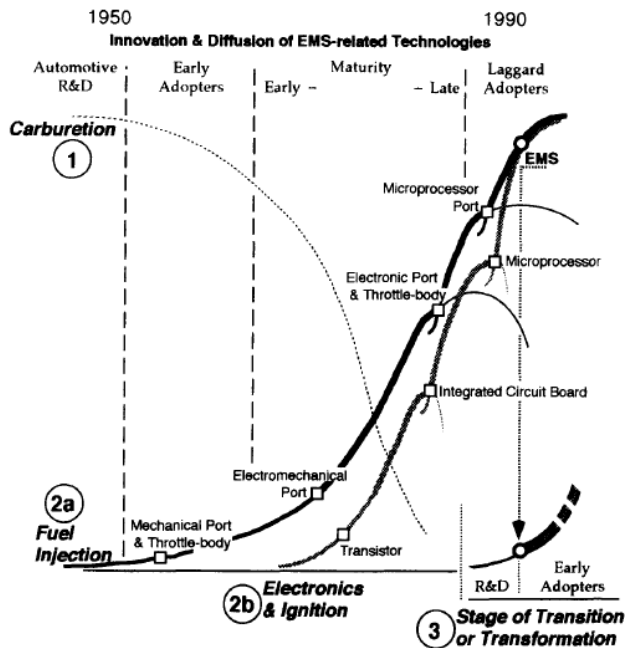
De klopsensor is een soort beveiligingssysteem dat ingebouwd wordt in het gesloten regelsysteem van de motor. Hierdoor verbetert het de veiligheid en betrouwbaarheid van de motor. Het ontstekingsmechanisme kan door de klopsensor ook sneller en exacter aangestuurd worden wat de prestatie en schadelijke emissies van de motor ten goede komt.

**Impact.** Buiten het technologische veld van motoren hebben deze sensors een enorme impact gehad op het gebied van de meet- en regeltechnieken. Waar voorheen grootheden zoals spanning, druk en trillingen gemeten werden aan de hand van grote en logge mechanische en pneumatische constructies, kan nu gewerkt worden met deze ultra kleine en precieze elektrische sensoren. Hierdoor kunnen deze grootheden gemeten worden in toepassingen waar voorheen een plaats- of gewichtsbeperking was.

### 3.1.2 *Engine Management System*

Het Engine Management Systeem (EMS) is een controle-eenheid welke alle gegevens van de motor controleert en hiermee de motor op een gepaste wijze aanstuurt. De opkomst van het EMS is een respons op de emissiewetgeving, brandstofverbruik regelgeving en verhoogde eisen van de consument in de jaren '70 en '80. Het EMS voegt de individueel ontwikkelde innovaties van injectiesystemen, ontstekingsystemen en elektronische systemen samen tot één geïntegreerde eenheid. Deze innovatie maakte zijn intrede in de midden jaren '80.

Het EMS heeft zijn oorsprong te danken aan de snelle evolutie van elektronische componenten. In de jaren '80 waren deze in staat complexe controletaken uit te voeren met meerdere in- en uitgangen. Enkele voorbeelden van ingangen zijn: ontstekingsspanning, ontstekingstijd, gasklepstand, uitlaatzuurstof, brandstofdruk, brandstofverbruik, pingelen, verschillende temperaturen, etc.. Ondertussen stond de evolutie van het injectie- en ontstekingsysteem ook niet stil. Hier werd overgeschakeld van mechanische en elektromechanische systemen naar elektronische en geautomatiseerde systemen. Figuur 1 toont alle innovaties en diffusies van de technologieën die gerelateerd zijn aan de ontwikkeling van het Engine Management Systeem, vanaf 1950 tot eind jaren '90.



**Figuur 1:** Innovaties en diffusies van EMS gerelateerde technologieën [6].

We onderscheiden vier levenscyclussen in figuur 1. Nummer 1 is deze van de carburator, welke bijna volledig verdwijnt in 1980 door de overname van brandstofinjectiesystemen. Nummer 2a en 2b zijn de opkomst van brandstofinjectie, ontsteking en elektronica. De vierkantjes duiden telkens op een nieuwe innovatie binnen deze technologie. Deze luiden telkens een nieuwe groei in de levenscyclus in. De derde levenscyclus is deze van het EMS. De R&D van dit systeem begint in 1990 en eindigt in de midden jaren '90. Het Engine management Systeem combineert brandstofinjectie, ontsteking en elektronica, dit is duidelijk in de grafiek. Het moment waarop het EMS systeem wordt ontwikkeld is ook het punt waar de levenscyclus van 2a en 2b samenvloeien. Deze samenvloeiing resulteert in de nieuwe levenscyclus nummer 3 van het EMS [6].

**Origine.** Het Engine Management Systeem maakt geen gebruik van een volledig nieuw technologisch veld. Het vloeit voort uit de enorme evolutie binnen het technologische veld van elektronica en microprocessoren. Oudere elektronische componenten werden al eerder gebruikt voor aansturingen binnen de motor. Doordat de elektronica zo snel is geëvolueerd is deze bijna volledig heruitgevonden in enkele jaren. Microprocessoren werden in de jaren '80 en '90 bijna in alle technologische velden geïntroduceerd en de verbrandingsmotor is hierop geen uitzondering. De originaliteit ligt hierdoor niet in het gebruik van de elektronica maar eerder in het samenvoegen van alle controlesystemen in één management eenheid.

**Functionaliteit.** De nieuwste component is de volledige controle-eenheid met microprocessor, samen met de nieuwe injectie- en ontstekingsystemen welke later worden besproken bij de mechanische innovaties. Er zijn in het begin van de jaren '90 enorm veel verschillende

Engine Management Systemen ontwikkeld. De reden hiervoor is dat er geen eenduidige correcte manier bestaat om alle processen van een motor te regelen. Een tweede reden is uiteraard ook dat er voor elk type motor en injectie- of ontstekingsysteem een andere controle-eenheid kan ontworpen worden. Enkele voorbeelden zijn de patenten van E. Jeenick et al. [17], J. J. Wunning et al [18] en J. Netherwood [19]. Bijlage 1 geeft een overzicht van alle componenten in een Engine Management Systeem met als hart de microprocessor of Engine Control Unit, nummer 20 [20].

**Impact.** Met het Engine Management Systeem kunnen alle motorparameters gebruikt worden om de meest ideale aansturing te berekenen voor de inlaat en ontsteking van de brandstof. Dit gebeurt door een voorgeprogrammeerde ontstekingsmap. Het effect hiervan is dat de emissies, het vermogen en het verbruik op elk moment exact gecontroleerd en aangestuurd kunnen worden. Dit alles zorgt ervoor dat verbrandingsmotoren aan de strenge emissiewetgevingen kunnen voldoen. Bijlage 2 toont de evolutie van de Europese emissiewetgeving vanaf 1992. We kunnen een duidelijke vermindering waarnemen in de toegestane uitstoot van alle schadelijke gassen. Het opkomen van de EMS innovatie is een van de belangrijkste redenen waardoor benzine motoren de stijgende eisen (hoger vermogen, lagere emissies en minder brandstofverbruik) hebben kunnen bijhouden.

### 3.2 Mechanische technologie

Er zijn doorheen het bestaan van de verbrandingsmotor continue nieuwe mechanische innovaties ontworpen. Hieronder volgt een bespreking van de belangrijkste mechanische innovaties binnen het technologische veld van verbrandingsmotoren in de periode 1980 tot 2010.

#### 3.2.1 DUKE motor

De DUKE motor is een nieuw type interne verbrandingsmotor waarbij de configuratie van de originele motor volledig is herdacht. Het eerste model is uitgevonden in 1993 en was een viertakt axiale zuigermotor. De cilinders van deze motor liggen axiaal rond de aandrijfas en draaien rond deze as tijdens het werken van de motor. De fysieke werking en de manier waarop het vermogen naar de aandrijfas wordt gebracht is nieuw ten opzichte van het originele concept van verbrandingsmotoren.

**Origine.** Het mechanische principe van axiaal roterende cilinders is compleet nieuw voor het technologische veld van motoren. Wel werden er al motoren ontworpen met radiaal roterende cilinders, zoals de Rotary motoren. De DUKE motor is echter de eerste motor waarbij de cilinders niet radiaal maar axiaal roteren rond de aandrijfas.

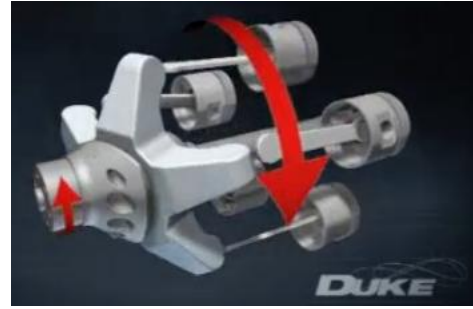
**Functionaliteit.** Door de axiale ligging van de cilinders moest het krukassysteem van de originele motor volledig herdacht worden. Hiervoor werd een volledig nieuwe Z-vormige krukas bedacht, zie figuur 2. Dit mechanische principe laat op zijn beurt een nieuw innovatief inlaatsysteem toe waarbij de cilinders over de inlaat- en uitlaatgaten glijden. Dit inlaatsysteem is nieuw aangezien het niet toepasbaar was op eerder bestaande motoren. De vijf cilinders hebben slechts drie bougies en drie brandstofinjectoren nodig. Door deze radicale nieuwe configuraties zijn de in- en uitlaatkleppen overbodig geworden, welke in de originele motoren vaak problemen veroorzaakten door oververhitting. Het aantal vaste en bewegende onderdelen is ook enorm gereduceerd.

**Impact.** De belangrijkste voordelen van de DUKE motor zijn zijn compactheid, gewicht/vermogen ratio en trillingvrijheid. Door deze enorme voordelen zal deze motor op alle gebieden van transport ingeschakeld worden. De eerste automobiele test was succesvol in 1999. Door de gewicht- en plaatsbesparingen is de motor uitermate geschikt voor de bemande en onbemande lichte vliegtuigen. Ook wordt de motor succesvol toegepast in de militaire drones met een groter bereik en minder onderhoud. Tot slot heeft deze motor geleid tot testen met alternatieve brandstoffen waaruit blijkt dat hij geschikt is voor elke vonkontstekende brandstof. Hiertoe behoren ethanol, methanol, bio ethanol, LPG, CNG, Waterstof, Kerosine en diesel [21].

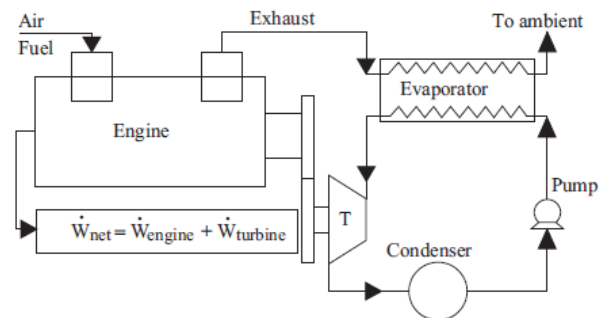
### 3.2.2 Thermodynamische warmte-energie recuperatie

Elke interne verbrandingsmotor die vandaag bestaat genereert warmte. Deze warmte kan beschouwd worden als verloren energie tenzij ze op een nuttige manier kan omgezet worden. Reeds in 1966 werd het algemene concept bedacht om de warmte van een motor door middel van een thermodynamische cyclus om te zetten in herbruikbare energie [22]. Deze techniek was enkel toepasbaar op grote motoren, van schepen of bedrijven, omdat zij genoeg warmte genereren. Later, in de jaren '80 werden systemen bedacht om de verloren warmte nog efficiënter om te zetten zodat het ook kon worden toegepast op de kleinere motoren.

Een eerste systeem maakt gebruik van koelwater rond de motor. Door de warmte van de motor ontstaat er stoom, welke vervolgens wordt gebruikt om een turbo aan te drijven. Deze turbo verhoogt de druk van de inlaatturbo waardoor de prestaties van de motor verhogen [23]. Een tweede systeem maakt gebruik van de warmte die overblijft in de uitlaatgassen. De energierecuperatie gebeurt in een Rankine cyclus waardoor water stroomt. Het water wordt in een boiler verwarmd door de uitlaatgassen tot stoom. Deze stoom wordt vervolgens geëxpandeerd in een turbine welke gekoppeld is aan de motor, zie figuur 3 [24]. In een variant op dit systeem wordt de stoom ook geëxpandeerd in één van de cilinders van de motor, merk op dat deze cilinder niet gebruikt wordt om benzine te verbranden [25].



Figuur 2: Z-vormige krukas DUKE motor [21].



Figuur 3: Combinatie Otto Cyclus en Rankine Cyclus [24].

**Origine.** Zoals reeds vermeld is het idee van een thermodynamische cyclus in het volledige technologische veld van motoren niet nieuw. Desondanks zijn dit wel de eerste toepassingen van thermodynamica met als doel vermogen te creëren naast een Otto-cyclus. Het eerste systeem maakt gebruik van een venturibuis. Dit principe steunt op het wetenschappelijke fenomeen waarbij een vernauwing in een buis een drukval of onderdruk creëert. Het gebruik van thermodynamische cyclussen voor de recuperatie van warmte energie van een motor is een logisch gevolg van de talloze andere recuperatietoepassingen in andere domeinen.

**Functionaliteit.** Het eerste systeem maakt gebruik van de waterkoeling van de motor, dit bestond reeds voor deze innovatie. De nieuwe componenten zijn de stoomafscheider welke de stoom van de koelvloeistof scheidt en de Venturi inlaatturbo welke voor een drukverhoging en verwarming van de inlaatgassen zorgt. Om de Rankine cyclus te kunnen toepassen heeft de motor enkele nieuwe onderdelen nodig, zoals een waterpomp, een warmtewisselaar, een expansieturbine en een condensor. Deze componenten worden gebruikt in een standaard thermodynamische configuratie [26].

**Impact.** Deze technologie maakte het mogelijk om energie te recupereren uit warmteverliezen van kleinere motoren zoals deze in een auto of boot. Het toepassen van stoom turbo's kan het vermogen van een motor met meer dan 7% doen toenemen en verbetert de thermische efficiëntie van de motor met ongeveer 38%. De eerste stoom turbo is uitgevonden in 1981 en zette de warmte om in elektrische energie. Met behulp van een



elektromotor kon deze energie vervolgens omgezet worden in mechanische energie om de initiële last te verlichten [27]. In de latere systemen, welke hierboven zijn besproken, is deze extra elektrische stap overbodig gemaakt. Dit toont aan dat deze eerste toepassing aanleiding gaf voor verder onderzoek naar toepassingen van thermodynamica in het technologische veld van motoren.

### 3.2.3 *Turboverbrandingsmotor*

De turboverbrandingsmotor is een recentere uitvinding uit 2004, en gepatenteerd in 2008, welke de standaard verbrandingscyclus combineert met turbinetechnologie. Deze motor maakt gebruik van één cilinder met een traditioneel piston en krukassysteem. Dit systeem dient voor de inlaat- en compressiecyclus zoals bij elke verbrandingsmotor. Het innovatieve aan deze uitvinding is dat de expansie- en uitlaatcyclus niet gebeuren in deze cilinder maar wel in een rotor rondom de cilinder. De verbrandingskracht werkt nu rechtstreeks op de rotor. Via deze manier wordt een maximaal moment omgezet in rotatie-energie op de aandrijfas van de motor. Een groot voordeel aan deze techniek is dat de verbranding niet beperkt is tot de inhoud van de cilinders, maar volledig kan gebeuren in een rotorcompartiment[28].

**Origine.** Een turbinesysteem voor de expansie van gassen is niet nieuw binnen het technologische veld van verbrandingsmotoren. Deze technologie gebruiken binnen de traditionele Otto-cyclus voor de verbranding- en uitlaatstap is wel een volledig nieuwe gedachtegang. Het opsplitsen van een goed werkende cyclus en deze vervolgens uitvoeren volgens twee technieken vereist originaliteit en ‘out of the box thinking’. Deze uitvinding is geen logische stap in de verdere ontwikkeling van de verbrandingsmotor.

**Functionaliteit.** De turboverbrandingsmotor maakt gebruik van een rotor waarin de verbranding plaatsvindt. Deze rotor is de belangrijkste nieuwe component van het systeem. Een rotor waarin een expansiecyclus gebeurt, is al eerder in een verbrandingsmotor gebruikt, onder andere bij de thermodynamische warmte-energie recuperatie. In deze toepassing ziet de rotor er echter anders uit en wordt hij ook op een andere manier gebruikt. De gassen verbranden namelijk in één bepaald compartiment in de rotor terwijl bij andere rotoren de expansie over de volledige radius van de rotor kan gebeuren.

**Impact.** Aangezien deze motor een redelijk recente uitvinding is, is de impact ervan binnen en buiten het technologische veld van motoren nog niet volledig gekend. Wel heeft deze motor enkele veelbelovende eigenschappen. Ten eerste is er de zeer interessante gewicht/vermogen ratio. De motor is ook zeer betrouwbaar en efficiënt door zijn unieke systeem om de kracht om te zetten in rotatie-energie. De turboverbrandingsmotor kan ook werken op alternatieve

milieuvriendelijke brandstoffen zoals alcohol, aardgas, brandstofcellen enzovoort [29].

### 3.2.4 *Libralato motor*

De libralato motor is een potentieel baanbrekende technologie binnen de ontwikkeling van ecologisch verantwoorde verbrandingsmotoren. Het concept is gepatenteerd in 2009, en het project is momenteel nog in uitvoering aan de Loughborough universiteit in het Verenigd Koninkrijk. De motor is gebaseerd op een nieuwe thermodynamische cyclus, de libralato cyclus, waarbij er gas uitwisseling bestaat tussen 3 verschillende verbrandingskamers. Het conventionele cilinder en piston systeem is vervangen door een rotor met een dubbel rotatiecentrum. Hierdoor kan de motor beschouwd worden als een opvolger van de wankelmotor [30].

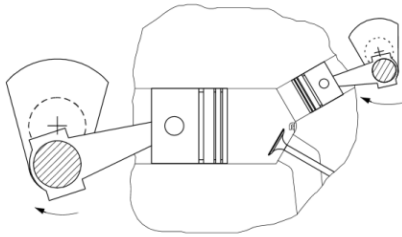
**Origine.** De meest bekende rotatie motor is de wankel motor. Deze maakt gebruik van de zelfde Otto-cyclus als een verbrandingsmotor met cilinder en piston. Het originele aan de libralato motor is dat deze gebruik maakt van het voordeel van een rotatiemotor om een andere thermodynamische cyclus toe te passen, namelijk de Libralato cyclus. Deze cyclus is nooit eerder gebruikt vandaar dat deze motor ook de naam van de cyclus draagt.

**Functionaliteit.** De libralato motor gebruikt slechts vier principiële bewegende onderdelen. Dit zijn de leidende rotor, de volgrotor, een roterende uitlaatpoort en een verschuifbare verbindingssader. Het verschil met de wankel motor is dat de rotor is opgesplitst in twee delen waardoor er openingen kunnen ontstaan tussen de drie verbrandingskamers. Deze functie is cruciaal voor de werking van de libralato cyclus [31].

**Impact.** De verbeteringen van de libralato motor zijn 9% efficiëntie verhoging, 4% verhoging van de thermische efficiëntie en 5% mechanische efficiëntie verhoging [32]. Zowel binnen als buiten het technologische veld van verbrandingsmotoren zijn er tot 2013 nog geen andere toepassingen bekend die gebruik maken van de Libralato cyclus.

### 3.2.5 *Alvar-cyclus motor en Hefley motor*

In de Alvar-cyclus en Hefley motor is er een variabele cilinderinhoud tijdens de werking van de motor mogelijk. Dit kan gerealiseerd worden door de lengte van de slag van de zuigers aan te passen, zonder dat de motor moet stoppen of uit elkaar gehaald worden. Deze techniek wordt als sinds 1914 toegepast aan de hand van mechanische gekoppelde staven aan de krukas. In 1991 werd een variabele cilinderinhoud mogelijk door een extra hulpcilinder bovenop de hoofdcilinder, zie figuur 4. Door het faseverschil tussen deze twee zuigers aan te passen kan de cilinderinhoud gewijzigd worden. Deze techniek staat bekend als de Alvar-cyclus, genaamd naar zijn uitvinder Alvar Gustavsson [33].



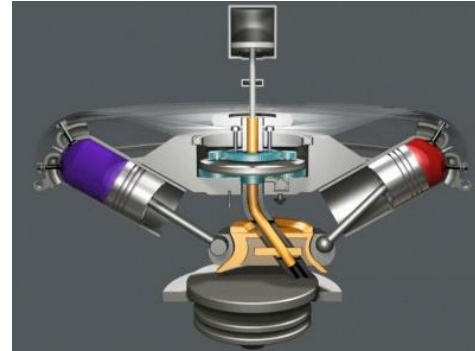
**Figuur 4:** Doorsnede cillinder Alvar-cycle motor [33].

In 2006 werd er een hydraulisch systeem bedacht waarmee de cilinderinhoud en de compressieratio kon worden aangepast tijdens het werken van de motor. Dit principe wordt toegepast in de Hefley motor. In deze motor liggen de cilinders radiaal en onder een hoek rond de hoofdas. De zuigers worden verbonden met de krukas door een speciaal lagersysteem dat over de krukas kan schuiven. De krukas ligt onder een hoek met de hoofdas. De positie van het lagersysteem op de krukas kan worden aangepast met een hydraulische actuator. Deze positie zal op zijn beurt de lengte van de slag van de zuigers bepalen. Figuren 5 en 6 tonen de twee uiterste posities van het lagersysteem op de krukas [34].

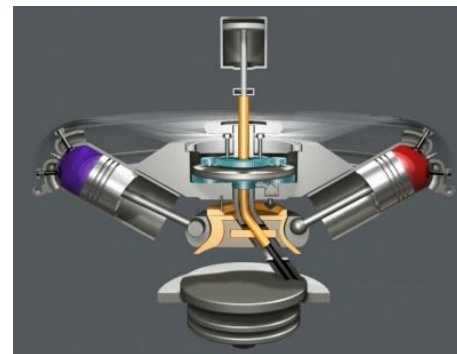
**Origine.** Het initiële idee om de cilinderinhoud en de compressieradius te variëren is niet origineel aangezien het al bestaat sinds 1914. De manier waarop dit gerealiseerd wordt is wel nieuw, zeker in het geval van de Hefley motor. In deze motor wordt gebruik gemaakt van hydraulica waar vorige motoren enkel mechanische systemen gebruikten.

**Functionaliteit.** De nieuwe onderdelen van de Alvar-cyclust motor zijn letterlijk een kopie van de conventionele verbrandingsmotor cilinders. Het gebruiken van twee cilinders in één verbrandingskamer is echter wel nieuw. In de Hefley motor worden er wel enkele totaal nieuwe onderdelen gebruikt. Zoals het redelijk ingewikkelde krukassysteem met het complexe lagerstuk. Verder bezit deze motor ook een hydraulisch systeem met een actuator voor het lagerstuk op de krukas. De functie van deze innovatie is om de zuiger slaglengte te kunnen aanpassen. De Hefley motor kan op elk type vonkontstekende brandstof werken door de compressieradius aan te passen aan de hand van het hydraulische systeem. Door enkel de zuigerverplaatsing aan te passen, en de compressieradius te behouden, kan de motor op zijn meest efficiënte punt afgesteld worden bij een gegeven brandstof en een bepaalde last. Dit alles wordt geregeld door een elektronische controle-eenheid [35].

**Impact.** De Alvar motor is een oplossing voor een motor met een variabele cilinderinhoud met potentiële toepassingen in de auto-industrie. Het grootste probleem is dat de motor twee zuigersystemen bevat wat een verdubbeling in mechanische onderdelen als gevolg heeft. Testresultaten tonen echter dat er een hoge efficiëntieverhoging mogelijk is zonder enige verhoging in de uitstootgassen [36]. De Hefley motor toont dezelfde efficiëntie verbeteringen tot 20% bij halve last.



**Figuur 5:** Doorsnede Hefley motor in onderste positie [34].



**Figuur 6:** Doorsnede Hefley motor in bovenste positie [34].

### 3.2.6 Scuderi Split-cycle motor en Scuderi lucht hybride motor

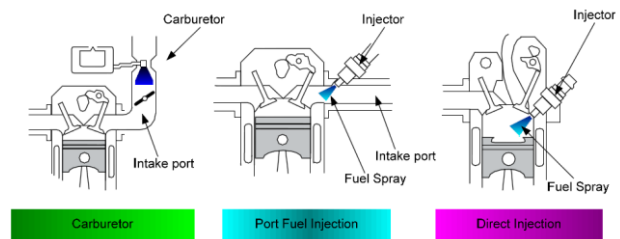
In 1994 bedacht Carmelo J. Scuderi een alternatief voor de Otto cyclus, dit resulteerde in een nieuwe Split-cycle motor in 2001. Later volgde een uitbreiding voor de Split-cycle motor waardoor er energie kan worden gerecupereerd met gecomprimeerde lucht, de lucht hybride motor.

In de Scuderi motor gebeurt de inlaat- en compressiestap en de vermogen- en uitlaatstap elk in een andere cilinder. Deze twee cilinders staan met elkaar in verbinding via een buis en kleppensysteem. Een belangrijke aanpassing was nodig aan het ontstekingsstijdstip om dit principe te doen werken. De brandstof wordt namelijk pas ontstoken nadat de cilinder zijn bovenste dode punt heeft bereikt. Door het opsplitsen van de stappen in twee verschillende cilinders kunnen deze cilinders individueel aangepast worden aan de vereisten voor de stappen. De eerste cilinder voor de inlaat en compressieslag is veel kleiner omdat de inlaatgassen worden aangedreven door een turbocompressor. Nog een groot voordeel aan de Scuderi motor is dat er een luchttopslagtank kan geplaatst worden tussen de twee cilinders. In deze cilinder kan perslucht opgeslagen worden die anders verloren zou gaan. Dit principe is hetzelfde als bij elektrische hybride systemen, enkel wordt er nu met perslucht gewerkt in plaats van elektriciteit. Vandaar de naam lucht hybride systeem.

**Origine.** Het originele aan deze uitvinding is, net zoals bij de turboverbrandingsmotor, het opsplitsen van de Otto cyclus in twee aparte delen. In tegenstelling tot de turboverbrandingsmotor gebeurt de verbrandingscyclus wel binnen hetzelfde technologische domein, enkel in twee verschillende cilinders. De lucht hybride motor gebruikt een origineel concept om verloren energie uit het remmen en van een helling rijden te recupereren via gecomprimeerde lucht in een luchttank.

**Functionaliteit.** De Split-cycle motor gebruikt, zoals de Alvar motor, twee cilinders voor één verbrandingscyclus. De eerste cilinder wordt uitsluitend gebruikt als compressor. In deze motor zijn geen componenten gebruikt die voordien nog niet gebruikt werden binnen het technologische veld van verbrandingsmotoren. De lucht hybride motor heeft wel een nieuwe component namelijk de luchttank. Deze tank wordt gebruikt voor het opslagen van gecomprimeerde lucht uit de eerste cilinder. De nieuwe functies van deze lucht hybride motor zijn vijf verschillende werkmodi. Eerst is er de normale motor mode waarbij de gecomprimeerde lucht van cilinder één rechtstreeks naar cilinder twee vloeit via de verbindingsleiding. De tweede is de luchtcompressie mode. De eerste cilinder perst nu de lucht samen terwijl de tweede vermogencilinder is uitgeschakeld. In deze mode kan er energie herwonnen worden tijdens het rijden van een helling of tijdens het remmen. In een derde mode wordt er enkel lucht uit de luchttank gebruikt waardoor er enkel een vermogensstap gebeurt. In een vierde mode wordt er zowel gebruik gemaakt van de eerste compressiecilinder als van de luchttank. In een laatste mode wordt er enkel perslucht uit de luchttank gebruikt om de cilinders aan te drijven, zonder het gebruik van brandstof [37].

**Impact.** De Scuderi Split-cycle motor kent een dramatische reductie in brandstof verbruik en CO<sub>2</sub> uitstoot ten opzichte van andere HEV (high-economy vehicle). De motor biedt ook een betere vermogensdichtheid, ecologische voetafdruk en is tot 15% efficiënter dan een gewone interne verbrandingsmotor. Verder gaf de Split-cycle technologie aanleiding tot de ontwikkeling van de nieuwe lucht hybride motor. Deze hybride motor kan het brandstofverbruik met 50% verminderen en de uitstoot van NO<sub>x</sub> met 80% verminderen. De lucht hybride motor heeft enkele zeer grote voordelen ten opzichte van een elektrisch hybride motor en heeft hierdoor het meeste potentieel om in de nabije toekomst geïmplementeerd te worden in hybride voertuigen [38].



**Figuur 7:** Drie verschillende systemen voor brandstofinjectie [20].

### 3.2.7 Injectiesysteem

Het injectiesysteem van een verbrandingsmotor heeft als doel de juiste hoeveelheid brandstof in de verbrandingskamer van de motor te voorzien. In de verbrandingskamer wordt een mengsel van brandstof en zuurstof verbrand. Er bestaan drie systemen voor de toevoer van dit gasmengsel. Het eerste systeem is de carburator welke hier niet zal besproken worden omdat de ontwikkeling volledig plaats vond voor 1980. Het tweede systeem is de homogene mengselvorming of port fuel injection. Hierbij wordt de brandstof met de lucht vermengd voor ze in de verbrandingskamer komt. De meeste benzinemotoren werken met dit principe. Het vermogen van de motor wordt geregeld door de hoeveelheid van het toegevoerde gasmengsel te controleren met behulp van een gasklep. Het derde systeem is de heterogene mengselvorming of directe injectie. Zoals de naam al doet vermoeden wordt de lucht en de brandstof apart geïnjecteerd, direct in de verbrandingskamer. De lucht stroomt aan een vast debiet, zonder gasklep. Het vermogen van de motor wordt geregeld door de hoeveelheid ingespoten brandstof te controleren. Deze techniek werd aanvankelijk enkel toegepast bij dieselmotoren. Latere ontwikkelingen, welke hieronder worden besproken, maakten de techniek ook toepasbaar in benzinemotoren. Figuur 7 toont de werking van de drie verschillende injectiesystemen.

We beginnen met de homogene mengselvorming. Tot aan de jaren '70 maakten bijna alle verbrandingsmotoren gebruik van een carburator voor de brandstof toevoer. Dit systeem gebruikt een Venturibuis welke steunt op het Bernoulli principe om de brandstof te mengen met de lucht. Met dit systeem is het echter zeer moeilijk om de emissies onder controle te houden. Door het vestrengen van de emissiewetgeving in de jaren '70 en '80 werd de carburator verdrongen door een nieuw injectie systeem. Dit systeem steunde eerst op mechanische en later op elektromechanische componenten om de brandstof te injecteren. Deze injectie gebeurt op de zelfde plaats als de carburator, namelijk in het throttle body net voor de inlaatkleppen. Vandaar de naam Throttle Body Injection (TBI). Met deze techniek kunnen de emissies van de motor aangepast worden door de verhouding van de brandstof en zuurstof te regelen in het gasmengsel. Het idee achter TBI werd bedacht in het begin van de jaren '70, en is verder geperfectioneerd door General Motors in het begin van de jaren '80 [39], [40]. In midden de jaren '80 werd dit systeem uitgebreid door elke cilinder van de

motor te voorzien van een individuele injector. Dit principe staat bekend als Port- of Multi-point fuel injection (MPFI) [41]. Kort hierna werd dit systeem geoptimaliseerd door elke injector individueel te activeren met behulp van elektronica. Dit systeem heet Sequential port fuel injection (SPFI).

Vervolgens wordt de evolutie van de heterogene mengselvorming besproken. De directe injectie (DI) van brandstof in de verbrandingskamer kent zijn oorsprong in de militaire applicaties. De eerste DI motor werd ontworpen door Daimler Benz in de jaren '30. Hierna volgden enkele toepassingen in de auto race wereld rond 1964. Het was pas na het opkomen van de elektronica in motoren dat het directe injectiesysteem echt toepasbaar werd in publieke voertuigen [42]. Het voornaamste probleem bij dieselmotoren is de emissie van roetdeeltjes. Een onvolledige verbranding van de brandstof in de verbrandingskamer is hiervan de oorzaak. Dit fenomeen is te wijten aan het feit dat diesel viskeuzer is dan benzine. Hierdoor is diesel moeilijker te versproeien en ontstaan er te grote brandstofdruppels. Om dit probleem aan te pakken heeft Bosch de Common-rail technologie ontwikkeld. In dit systeem wordt de brandstof onder zeer hoge druk, ongeveer 1350 bar, in een gemeenschappelijk reservoir gepompt. Vanuit dit reservoir, de Common-rail, wordt de brandstof verdeeld naar alle injectoren [43]. De ontwikkeling van het Common-rail injectiesysteem vond plaats in de jaren '80 en begin jaren '90 [44], [45]. De eerste toepassing van het Common-rail injectiesysteem vond plaats in 1997 in Alfa Romeo voertuigen en de Mercedes-Benz C220 CDI. De eerste directe injectie toepassingen maakten gebruik van elektromagnetische brandstofinjectoren. Later, in 2003, werden deze vervangen door piëzo-elektrische injectoren [46], [47].

Ondanks de vele voordelen van homogene mengselvorming systemen bij de benzinemotoren, kunnen deze systemen niet voldoen aan de continue verhogende eisen omtrent prestaties, emissie wetgeving en brandstofverbruik van heden. De Multi-point Fuel injectiesystemen werden hierdoor sinds de jaren '90 vervangen door elektronische Gasoline Direct Injection systemen (GDI). Benzine kan enkel ontsteken bij een bepaalde stoichiometrische waarde, dit is de reden waarom directe injectie pas later toepasbaar was in benzinemotoren dan in dieselmotoren. Het GDI systeem werkt met een arm mengsel principe (lean burn engine). Dit arm mengsel zou niet tot ontsteking kunnen komen met indirecte injectie [20].

**Origine.** Over het algemeen zijn er sinds 1980 weinig originele principes toegepast in de evolutie van de carburator naar de indirecte en directe injectie. De reden hiervoor is dat de principes die de evolutie hebben gevoed reeds individueel ontwikkeld waren voor de jaren '80. Een voorbeeld hiervan is de piëzo-elektrische brandstofinjector die een 3<sup>de</sup> generatie Common-rail injectiesysteem inluidde in 2003. Dit terwijl de piëzo-elektrische injector reeds in 1965 ontwikkeld is [48].

**Functionaliteit.** In de evolutie van de homogene mengselvorming zijn er bijna geen nieuwe componenten gebruikt. De throttle body en de gasklep van de TBI bestonden reeds bij de carburatoren. De gebruikte injectoren bestonden al voor 1980. Verder heeft er zich vooral een vermenigvuldiging van de zelfde bestaande onderdelen voorgedaan bij de Multi-point injectiesystemen. Bij de evolutie van de heterogene mengselvorming zijn er wel enkele nieuwe componenten bijgekomen. Voornamelijk bij de overgang naar het common-rail injectiesysteem. Deze maken gebruik van een hoge druk brandstof rail en pomp. De stroom aan innovaties van het injectiesysteem hebben de mogelijkheid gecreëerd om de motor op een efficiënt en milieuvriendelijke manier aan te sturen en te controleren. De ontwikkeling van het GDI systeem heeft de functie van directe injectie ook mogelijk gemaakt voor benzinemotoren.

**Impact.** De evolutie van zowel de homogene als heterogene mengselvorming systemen hebben drastische verbeteringen veroorzaakt op vlak van prestaties, emissies en brandstofverbruik. Het indirecte Throttle body injectie systeem leidde tot belangrijke verbeteringen en innovaties via het Multi-point injectiesysteem en later tot de Sequentiële brandstofinjectie. De directe injectie leidde tot het intreden van de common-rail. Dit laatste systeem maakte het mogelijk om brandstof te injecteren met een druk van meer dan 1500 bar. De impact hiervan is dat de injectietijd en druppeldiameter afneemt terwijl de dispersie en werpkracht in de verbrandingskamer toeneemt. Tot slot zorgde het lean burn engine principe ervoor dat directe injectie ook mogelijk werd voor benzinemotoren. Hierdoor kunnen de benzinemotoren mee genieten van alle voordelen van directe injectie. De conclusie is dat elk van deze innovaties een duidelijke aanleiding gaf voor verdere innovaties binnen het technologische veld van verbrandingsmotoren

### 3.3 Zoeksleutel

Voor elke innovatie is een zoeksleutel opgesteld. Het doel hiervan is om de innovaties te kunnen vinden in de database van alle patenten. Voor de meeste innovaties is het patent zelf gezocht. Anders wordt er gebruik gemaakt van trefwoorden of bedrijfsnamen. Bijlage 3 toont een overzicht van de gevonden patenten per innovatie.

## 4 RESULTATEN

De zoek sleutel voor alle gevonden innovaties in het technologische veld van verbrandingsmotoren, zie bijlage 3, wordt nu gebruikt om de indicatoren te testen. Eerst wordt de volledige familie van de patenten uit de zoek sleutel geïdentificeerd. Dit zijn bijvoorbeeld patenten met dezelfde inhoud maar uitgegeven in een ander land of werelddeel. De score op de indicatoren, uit paragraaf 1, van deze groep families wordt vervolgens getest. Dit gebeurt zowel op het 4-digit als het 6-digit classificatieniveau van het Internationaal Patent Classification (IPC) systeem [3]. Het resultaat hiervan wordt hieronder beschreven en onderzocht.

### 4.1 Algemene resultaten

Bij het onderzoeken van de algemene resultaten van alle innovaties vallen enkele ongewenste zaken op. Eerst en vooral is het duidelijk dat zeer weinig patenten scoren op de indicator voor nieuwe functionaliteit. Dit stellen we vast voor zowel het 4-digit niveau als het 6-digit niveau. Ten tweede merken we dat er sommige patenten scoren met combinaties die eerder toevallig lijken voor te komen. Dit terwijl deze combinaties inhoudelijk eerder irrelevant zijn. Hieronder worden de oorzaken onderzocht en eventuele oplossingen besproken.

#### 4.1.1 Indicator voor nieuwe functionaliteit

Het doel van de indicator voor nieuwe functionaliteit is om nieuwe mogelijkheden te vinden van de innovatie. Wanneer geen enkel patent scoort op deze indicator kan dit twee oorzaken hebben. De innovaties hebben geen nieuwe functies bijgebracht of de indicator werkt niet zoals gewenst. Om de indicator te toetsen bekijken we eerst de resultaten op het 4-digit en daarna op het 6-digit niveau. Het International Patent Classification (IPC) systeem deelt de patenten op het 4-digit niveau in op basis van het doel of de functie van het patentonderwerp. Voorbeelden zijn: F02D (Controlling combustion engines), F02N (Starting of combustion engines) en F02P (Ignition for internal-combustion Engines). Op het 6-digit niveau worden de patenten verder onderverdeeld op basis van de manier waarop ze hun doel of functie bereiken. Voorbeelden zijn: F02D 13 (Controlling the engine output power by varying inlet or exhaust valve), F02N 11 (Starting of engines by means of electric motors) en F02P 21 (Direct use of flames or burners for ignition). Over het algemeen wordt deze classificatiestructuur gebruikt, soms zijn er hierop uitzonderingen.

Voor het vinden van nieuwe functionaliteiten van een innovatie lijkt het ideaal om op het 4-digit niveau te zoeken. Toch scoort er geen enkele voorgestelde innovatie op dit niveau. Van alle voorkomende combinaties van patentklassen in de gebruikte familie van patenten, is er geen enkele combinatie die op het 4-digit niveau voor het eerst voorkomt na 1961. De reden hiervoor is dat de groepen op dit niveau te uitgebreid zijn waardoor de kans op een zelfde combinatie door een andere innovatie heel groot is.

Op het 6-digit niveau zijn er slechts acht IPC combinaties die binnen het onderzochte tijdsinterval van 1980 tot 2010 vallen, zie tabel 1. Op het 6-digit niveau zijn patenten met hetzelfde doel opgesplitst in verschillende klassen. Dit leidt tot nieuwe mogelijke klassencombinaties van verschillende patenten zonder dat er een nieuw doel of functie wordt toegepast in het patent. Hierdoor zal de indicator voor nieuwe functionaliteit op het 6-digit niveau veel valse combinaties opleveren, dit probleem wordt verder besproken in de volgende paragraaf.

**Tabel 1:** Jaren van de eerste unieke klassencombinaties van de familie patenten vanaf 1980.

Klasse 1	Klasse 2	Jaar
F02P 5	F04B 41	2006
B60K 6	F02B 25	2001
F01L 9	F02D 43	1982
G01J 1	H01T 13	1981
G01J 5	H01T 13	1981
B60K 6	F02B 33	1980
F02B 21	F02D 17	1980
F02B 39	F02P 5	1980

Om de indicator voor nieuwe functionaliteit toch op een meer gedetailleerd niveau te laten werken, kunnen de patenten op het 6-digit niveau gegroepeerd worden. De eenvoudigste manier voor deze groepering is door gebruik te maken van de onderverdeling van het IPC. Dit gebeurt door tussentitels op het 6-digit niveau. Een nadeel van deze verdeling is dat er geen systematische regel wordt gebruikt voor de verdeling in deze subgroepen. De resultaten zullen verbeteren ten opzichte van het 4-digit niveau maar het zal nog steeds onbetrouwbaar voor sommige innovaties zijn.

De tweede reden waarom er weinig of niet wordt gescoord op de indicator voor nieuwe functionaliteit is dat er slechts weinig nieuwe functies ontstaan in het technologische veld van verbrandingsmotoren. Bijna alle innovaties besproken in paragraaf 3 resulteren in betere prestaties, emissies of dimensies van de motoren en niet in nieuwe functies. Een minder aantal scores op de indicator voor nieuwe functionaliteit ten opzichte van de indicator voor nieuwe origine was hierdoor verwacht.

#### 4.1.2 Indicator voor nieuwe origine

In tegenstelling tot de indicator voor nieuwe functionaliteit is de indicator voor nieuwe origine wel effectief op het 6-digit niveau. De reden is dat de manier waarop het doel van een patent bereikt wordt wel belangrijk is bij het zoeken naar nieuwe origine. Zoals reeds vermeld komen er op het 6-digit niveau onlogische en inhoudelijk irrelevante klassencombinaties voor welke patenten onterecht doen scoren op indicatoren. Dit is een logisch gevolg van het gebruiken van alle paarsgewijze klassencombinaties die een patent bezit. Bijlage 4 geeft

een overzicht van alle klassencombinaties die een patent doen scoren op de indicator voor nieuwe origine zonder relevante informatie te bezitten. Bij het bekijken van deze lijst valt op dat de meeste irrelevante combinaties verwijzen naar ontwerp en productie details van het patentonderwerp. De reden hiervoor is dat sommige patenten kort de productie van enkele kritieke onderdelen aanhalen. Deze patenten scoren vervolgens op de indicatoren zonder dat de klassencombinaties nieuwe origine, functie of impact weerspiegelen. Om deze combinaties te negeren zou een lijst kunnen opgesteld worden met klassen die niet mogen scoren wanneer ze voor het eerst in een combinatie voorkomen. De grootste groep van irrelevante combinaties komen uit de hoofdklasse B (Performing operations; Transporting) en E (Fixed constructions). Het selecteren van irrelevante klassen moet echter op een zeer zorgvuldige manier gebeuren aangezien innovaties onvoorspelbaar zijn.

## 4.2 Resultaten per innovatie

In deze paragraaf worden de resultaten van elke innovatie individueel onderzocht. We bekijken waarom een bepaalde innovatie wel of niet scoort op indicatoren en vergelijken dit met onze verwachtingen uit paragraaf 3. Wanneer een innovatie niet scoort terwijl we dit wel verwachten gaan we op zoek naar de oudere patenten die wel scoren met de verwachte referenties of classificatieoverlappen. Door deze patenten te vergelijken kan beoordeeld worden of het te onderzoeken patent al dan niet had moeten scoren op de indicator. Wanneer het patent wel had moeten scoren gaan we dieper in op de reden waarom hij niet scoort. Tot slot wordt er waar mogelijk een oplossing gezocht om gelijkaardige fouten te kunnen vermijden.

### 4.2.1 Engine Management System

De familie van patenten rond de innovatie van het EMS scoort niet op de indicatoren nieuwe origine en nieuwe functionaliteit. Terwijl we dit vanuit de literatuurstudie wel zouden verwachten. Wanneer we naar de data kijken valt op dat het patent van J. J. Wunning 1992 [18] enkele citaties gebruikt die voor het eerst voorkomen in 1991. Tabel 2 geeft een overzicht van deze IPC combinaties.

**Tabel 2:** Citerende klassencombinaties van het EMS voor het eerst gebruikt in 1991.

Klasse citerden patent	Klasse geciteerd patent	Prioriteit jaar
F02D 43	H01L 41	1991
F02D 43	H02P 6	1991
F02D 13	H02P 6	1991
F01L 9	H02P 6	1991

De eerste rij van tabel 2 vertelt ons dat er in 1991 voor het eerst een patent uit klasse F02D 43 (Controle van twee of meerder functies van een verbrandingsmotor) een werk heeft geciteerd uit de klasse (Piëzo-elektrische, Elektrostrictieve en Magnetostrictieve apparaten). Omdat het patent van J. J. Wunning uit 1992 niet als eerste deze combinatie maakte, scoort het dus niet op nieuwe origine. We kunnen echter stellen dat innovaties niet onmiddellijk kunnen ontstaan. Deze nemen steeds enkele jaren in beslag. Het toekennen en onderzoeken van een patent op zich kan al enkele jaren in beslag nemen. De regel dat een patent pas scoort op een indicator als hij absoluut de eerste combinatie vormt lijkt hierdoor te streng. Er kan geopteerd worden voor een tijdsinterval. Wanneer de oorsprong van een patent binnen dit interval rond de eerste combinatie valt, zal het alsnog scoren op de indicator. Wanneer twee patenten binnen hetzelfde tijdsinterval voor een bepaalde combinatie van klassen vallen zijn er twee mogelijkheden. Ofwel gaan de patenten over dezelfde innovatie en zullen ze beiden scoren op een indicator. Ofwel bezitten deze patenten toevallig een zelfde combinatie en gaat het om twee verschillende innovaties. In beide gevallen is het logisch dat de twee patenten scoren op de indicator.

Het patent van J. M. Clarke en J.J. Faletti uit 1991 [49] citeerden als eerste vanuit de klasse F02D 43 naar een werk uit de klasse H01L 41. Na het vergelijken van dit patent en het patent van J. J. Wunning uit 1992 kan vastgesteld worden dat dit laatste een uitbreiding is op het eerste patent. De twee patenten zijn van het bedrijf Caterpillar Inc. en hebben hetzelfde onderwerp, namelijk de aansturing van alle belangrijke motorparameters vanuit één controlepunt. De reden waarom het patent uit 1992 niet scoort op de indicator voor nieuwe origine ligt dus niet aan de indicator zelf maar aan het feit dat niet het oudste patent gevonden werd in de innovatiestudie van paragraaf 3. Als het patent van 1991 was voorgesteld, had de indicator deze wel opgemerkt.

### 4.2.2 Thermodynamische warmte-energie recuperatie

Binnen de innovatie van thermodynamische warmte-energie recuperatie zijn er enkele patenten die wel scoren op de indicator nieuwe origine. Zo is er het patent van Kriessl, et al. uit 1981 [27] dat voor het eerst citeert vanuit de klasse F02G 5 (Profiting from waste heat of combustion engines) naar de klassen H02K19 (Synchronous motors or generators) en H02K1 (Dynamo-electric machines magnetic circuit). Het volgende patent van R. G. Battaglini uit 1988 [23] citeert als eerste vanuit de klasse F02D 19 (Controlling engines characterised by their use of non-liquid fuels, pluralities of fuels, or non-fuel substances added to the combustible mixtures) naar de klassen F04F 5 (Jet Pumps) en F25B 30 (Heat Pumps). Het laatste patent, dit van T. Stenhede uit 1988 [50], citeert als eerste vanuit de klasse F01K 23 (Plants characterised by more than one engine delivering power external to the plant) naar de klasse F02G 5 (Heat-exchange apparatus). Dit resultaat ligt volledig in lijn met

de evolutie van deze innovatie besproken in paragraaf 3. In de eerste warmte-energie recuperatie systemen werd gebruik gemaakt van elektrische motoren, dit klopt met de combinatie van het patent uit 1981. In de latere ontwikkelingen werd de verloren energie rechtstreeks omgezet in vermogen. Hierdoor bezat de motor meer dan één vermogenssysteem, dit leidde tot de klassencombinatie van het patent uit 1988. Alle nieuwe klassencombinaties van deze innovatie waren logisch en verwacht, er werden geen onlogische of foute combinaties gevonden.

#### 4.2.3 *Turboverbrandingsmotor*

Het patent van de Turboverbrandingsmotor van J. I. Yadegar uit 2004 [28] citeert als eerste vanuit de klasse F02B 73 (Combinations of two or more engines) naar de klasse F01B 5 (Reciprocating-piston machines). Dit wil zeggen dat deze innovatie wel degelijk als eerste gebruik maakt van een combinatie van een zuigermotor en een turbinemotor. De verwachting voor deze innovatie was dat er nieuwe combinaties werden gebruikt tussen de klassen van de zuiger- en turbinemotor. Dit is niet het geval aangezien de motor wordt onderverdeeld in de klasse voor motoren met een combinatie van twee of meerdere systemen. Vanuit deze klasse werd wel een nieuwe combinatie opgemerkt. Dit is in lijn met de verwachtingen en er treden geen valse of onlogische combinaties op.

#### 4.2.4 *Scuderi Split-cycle motor en Scuderi lucht hybride motor*

De innovatie van de Scuderi motor zou goed moeten scoren op de indicatoren zowel voor nieuwe functionaliteit als origine. Volgens de opgestelde indicatoren scoren bijna alle patenten uit de familie van deze innovatie. De unieke klassencombinaties waardoor de patenten scoren hebben echter geen betekenis. Dit probleem werd al in de algemene resultaten besproken. De patenten scoren niet op de klassencombinaties die we zouden verwachten. Enkele verwachtingen zijn: F02B33(Engines characterised by provision of pumps for charging or scavenging) en F02B41 (Engines characterised by special means for improving conversion of heat or pressure energy into mechanical power) of een combinatie van F02B21 (Engines characterised by air-storage chambers) en F02B41 (Engines characterised by special means for improving conversion of heat or pressure energy into mechanical power). Sommige patenten uit de familie patenten van de innovatie worden niet eens onderverdeeld in één of twee klassen van de verwachte klassencombinaties. Hierdoor komen de verwachte combinaties niet of maar enkele keren voor. Patenten met hetzelfde onderwerp maar voor een andere regio bezitten vaak andere klassen. Hieruit kan worden afgeleid dat de indeling in de internationale klassen niet consequent en eenduidig gebeurt. Alle patenten van de innovatie groeperen in een familie en vervolgens de indicatoren gebruiken op deze familie kan dit probleem grotendeels reduceren. Eventueel kunnen de combinatie

van klassen tussen verschillende patenten van dezelfde familie mee in rekening gebracht worden.

De verwachte klassencombinaties die wel voorkomen in de familie van patenten komen niet voor het eerst voor in deze patenten. Enkele verwachte combinaties werden al gebruikt in oudere innovaties, zoals de lucht tank welke voor het eerst gebruikt werd in 1975 in het patent van Hubers Cornelius [51]. Voor deze combinaties werkt de indicator correct aangezien het patent niet mag scoren wanneer de origine of functie al eerder is toegepast. Voor combinaties met de klasse F02B33 werkt de indicator niet correct. De patenten van de Scuderi motor worden in deze klasse onderverdeeld omdat de eerste van de twee cilinders van het split-cycle principe wordt beschouwd als een pomp voor de inlaatgassen. De klasse F02B33 is een zeer grote klasse waarin veel verschillende type inlaatsystemen worden onderverdeeld. Dit geeft aanleiding tot 22 subklassen binnen de klasse F02B33. Hierdoor bestaan er veel zelfde combinaties met deze klasse zonder dat het over dezelfde origine gaat. Een oplossing hiervoor is om de patenten op een volgend IPC niveau te testen. Dit zou echter leiden tot veel meer onterechte en irrelevante scores terwijl het 6-digit niveau al goede resultaten toont. Daarom wordt voorgesteld om enkel de klassen van het 6-digit niveau op te splitsen wanneer deze meer dan een bepaald aantal subklassen bezitten. Op deze manier worden de 6-digit klassen enkel opgesplitst wanneer ze een te uitgebreide groep vertegenwoordigen.

## 5 BESLUIT

Over het algemeen werken de indicatoren voor functionaliteit en origine goed. Enkele voorgestelde innovaties, zoals de thermodynamische warmte-energie recuperatie en turboverbrandingsmotor, weerspiegelen de resultaten de verwachtingen volledig. Bij andere voorgestelde innovaties, zoals het EMS en de Scuderi motor, zijn er enkele verschillen tussen de resultaten van de indicatoren en de verwachtingen. Het onderzoek van deze verschillen leidde tot een aantal mogelijke verbeteringen voor de indicatoren. Vooral op de indicator voor nieuwe functionaliteit scoren slechts enkele patenten van de voorgestelde innovaties binnen het technologische veld van verbrandingsmotoren. De belangrijkste reden hiervoor is dat de innovaties binnen dit veld slechts weinig of geen nieuwe functionaliteiten hebben bijgebracht in de periode van 1980 tot 2010. Om betere resultaten te verkrijgen op deze indicator wordt voorgesteld om op een niveau tussen het 4- en het 6-digit niveau van het IPC te werken. Dit tussenniveau kan gecreëerd worden door gebruik te maken van de tussentitels van het IPC op het 6-digit niveau.



De indicator voor nieuwe origine functioneert het best op het 6-digit niveau. Dit komt omdat de patenten op dit niveau over het algemeen worden onderverdeeld in klassen op basis van de manier waarop ze hun doel bereiken. Een nadeel is dat er op dit niveau veel irrelevante combinaties kunnen voorkomen. Hierdoor scoren sommige patenten onterecht op de indicator voor nieuwe origine. Bij het onderzoek van deze valse scores bleek dat dit voornamelijk te wijten was aan combinaties met de hoofdklassen B (Performing operations; Transporting) en E (Fixed constructions). De reden hiervoor is dat sommige patenten de constructie van onderdelen aanhalen in de beschrijvingen. Om deze fouten te vermijden kan er een lijst opgesteld worden met alle irrelevante klassen welke niet mogen scoren in combinaties met andere klassen.

Sommige klassen op het 6-digit niveau zijn nog steeds te groot waardoor ze te veel verschillende onderwerpen vertegenwoordigen. Het volgende niveau zal hiervoor geen oplossing bieden wegens een teveel aan irrelevante combinaties. Daarom wordt voorgesteld om enkel de klassen met meer dan een bepaald aantal subklassen op te splitsen. Hierdoor kunnen we specifieker werken in grote klassen zonder dat de kleinere klassen opgesplitst worden en irrelevante scores veroorzaken.

Tot slot werd ook opgemerkt dat de patenten niet steeds consequent en eenduidig worden onderverdeeld in de klassen van het IPC systeem. Patenten met dezelfde inhoud maar voor een ander land of werelddeel worden vaak in een andere groep van IPC klassen onderverdeeld. Dit kan aanleiding geven tot klassencombinaties die niet worden opgemerkt voor een bepaalde innovatie. Om dit probleem volledig weg te werken kunnen alle paarsgewijze klassencombinaties tussen patenten van dezelfde familie mee in rekening gebracht worden.

Al deze verbeteringen werden voorgesteld op basis van de kennis verworven tijdens het onderzoek van de verschillen tussen de verwachtingen en de resultaten van de indicatoren. In eventuele verdere studies kunnen deze voorgestelde verbeteringen getest worden. Hierbij dient onderzocht te worden of de verbeteringen de problemen waarvoor zij zijn opgesteld effectief oplossen. Tot slot moet de indicator voor nieuwe impact nog getest worden. Aangezien deze volgens hetzelfde principe werkt als de indicator voor nieuwe origine zullen de problemen en hun mogelijke oplossingen niet veel verschillen.

## 6 DANKWOORD

Het onderzoek in deze paper en het verkrijgen van de patentdata was niet mogelijk geweest zonder de hulp van mijn copromotor. Hiervoor wil ik Dennis Verhoeven, mijn copromotor aan KULeuven, bedanken voor zijn begeleiding en assistentie doorheen het hele jaar. Ook zijn vakkennis en beschikbaarheid zijn van grote waarde geweest voor deze thesis.



## 7 REFERENTIES

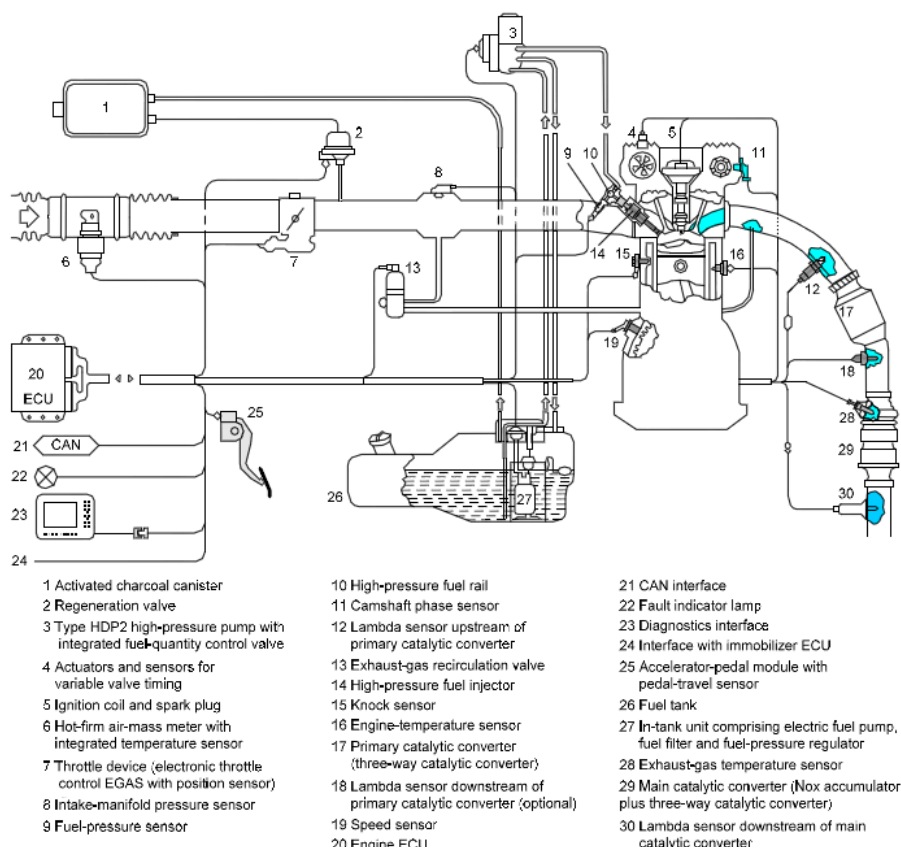
- [1] K. B. Dahlin en D. M. Behrens, „When is an invention really radical? Defining and measuring technological radicalness,” *Research Policy*, nr. 34, pp. 717-737, 2005.
- [2] B. W. Arthur, *The nature of Technology: What it is and How it Evolves*, Great Britain: Allen Lane, 2009.
- [3] WIPO, „Preface to the international patent classification (IPC),” WIPO IP services, 2013. [Online]. Available: [www.wipo.int](http://www.wipo.int). [Geopend 22 04 2013].
- [4] D. Verhoeven en R. V. Jurriën Bakker, *Measuring Radical Invention: New Origins, Novelty and New Impact*, Leuven, 2013.
- [5] Engine Technology International, „Engine Technology International,” Engine Technology International, 2013. [Online]. Available: <http://www.enginetechnologyinternational.com>. [Geopend 22 04 2013].
- [6] R. G. Amey, „Automotive component innovation: development and diffusion of engine management technologies,” *technovation*, pp. 211-223, 1995.
- [7] J. Linton, „Technocation,” Elsevier, 2013. [Online]. Available: <http://www.journals.elsevier.com/technovation/>. [Geopend 22 04 2013].
- [8] W. J. Fleming, „Overview of Automotive Sensor,” *IEEE Sensors Journal*, VOL.1, NO 4, p. 13, 2001.
- [9] C. Berggren en T. Magnusson, „Reducing automotive emissions The potentials of combustion engine technologies and the power of policy,” *Energy Policy*, nr. 41, pp. 636-643, 2012.
- [10] W. Knecht, „Diesel engine development in view of reduced emission standards,” *Energy*, nr. 33, pp. 264-271, 2008.
- [11] W. B. Ribbens, *Understanding Automotive Electronics*, United States of America: Newnes, 2003.
- [12] J. E. Keem, „Interactive piezoelectric knock sensor”. U.S. Patent 4.254.354, 3 Maart 1981.
- [13] B. Böning, R. Bone, R. Nagel en H. Reum, „Optical combustion event sensor structure particularly knock sensor for an internal combustion engine”. Germany Patent 4.446.723, 8 mei 1984.
- [14] P. Freitas, R. Ferreira, S. Cardoso en F. Cardoso, „Magnetoresistive sensor,” *Journal of Physics: Condensed matter* 19, p. 21, 2007.
- [15] H.-J. Hamisch, M. Boruschewitz en T. Gast, „Magnetostrictive engine-knock sensor”. Germany Patent 4.383.434, 17 mei 1983.
- [16] H. Kwun en K. Bartels, „Magnetostrictive sensor technology and its applications,” *Ultrasonics* 36, pp. 171-178, 1998.
- [17] E. Jeenick, W. Klötzner, C. Meichle, M. Schenk en I. Grille, „Input-Output unit for microprocessor controlled ignition or injection systems in internal combustion engines”. Germany Patent 4.250.858, 1981.
- [18] J. J. Wunning, E. W. Davis, L. E. Schmidt, R. J. Penick, M. Z. Deiri en P. M. Young, „Control system for an internal combustion engine”. U.S. Patent 5.201.296, 1992.
- [19] J. Netherwood, „System, Engine Management”. U.S. Patent 5.605.135, 1995.
- [20] M. B. Çelik en B. Özdalyan, „Gasoline direct injection,” *Fuel Injection*, p. 19, 2010.
- [21] R. Muller en J. Gravey, „Info over Duke motoren,” 2013. [Online]. Available: <http://www.dukeengines.com/>. [Geopend 23 Maart 2013].
- [22] R. W. P. Johnson, „Internal Combustion Engine Plant”. England Patent 3.350.876, 1967.
- [23] R. G. Battaglini, „Waste Heat Steam Supercharger”. U.S. Patent 4.913.098, 1988.
- [24] W. Tianyou, Z. Yajun, P. Zhijun en S. Gequn, „A review of researchs on thermal exhaust heat recovery with Rankine Cycle,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15, pp. 2862-2871, 2011.
- [25] F. Jianqin, L. Jingping, R. Chengqin, W. Linjun, D. Banglin en X. Zhengxin, „An open steam power cycle used for IC engine exhaust gas energy recovery,” *Energy* 44, pp. 544-554, 2012.
- [26] F. E. Wicks. U.S. Patent 5.000.003, 1989.
- [27] O. Kriessl, J. Schurrer, K. Mötz, W. Leitgeb en H. Rosenberg, „Method and apparatus for utilizing the waste heat energy of an internal combustion engine”. Germany Patent 4.394.582, 1981.
- [28] J. I. Yadegar, „Turbocombustion Engine”. U.S. Patent 7.451.738, 25 mei 2004.
- [29] J. I. Yadegar, „Turbocombustion Engine”. U.S. Patent 0263.128, 25 mei 2004.
- [30] Libralato Engines, „Technology,” 1 December 2010. [Online]. Available: [http://www.libralato.co.uk/t\\_advantages.html](http://www.libralato.co.uk/t_advantages.html). [Geopend 24 Maart 2013].
- [31] R. Libralato, „Endothermic Rotary Engine with two Parallel Rotation Axes”. Italie Patent WO 2004/020791, 11 Maart 2004.
- [32] R. Kent, „Project Libralato Engine Prototype,” 1 December 2011. [Online]. Available: <http://cordis.europa.eu>. [Geopend 24 Maart 2013].
- [33] A. Gustavsson, „Internal combustion engine”. Sweden Patent 5.188.066, 1991.
- [34] F. Tavares, R. Johri en Z. Filipi, „Simulation study of advanced variable displacement engine coupled to power-split hydraulic hybrid powertrain,” *Mechanical Engineering, University of Michigan*, p. 14, 2012.

- [35] C. D. Hefley, „Variable Displacement/compression engine”. U.S. Patent 7.270.092, 2006.
- [36] O. Erlandsson, G. Lundholm, F. Söderberg en B. Johansson, „Demonstrating the performance and emission characteristics of a variable compression ratio, Alvar-cycle Engine,” *International fall Fuels and Lubricants*, p. 12, 1998.
- [37] Scuderi Group, „Scuderi Engine revolutionary technology evolutionary design,” 2013. [Online]. Available: <http://www.scuderiengine.com/>. [Geopend 1 April 2013].
- [38] Scuderi Engine, „Electric cars, Hybrids and the internal combustion engine current use, future benefits,” *Scuderi Group*, p. 8, 1 July 2010.
- [39] J. C. Byrne, „Single injector Throttle body”. U.S. Patent 3.943.904, 1974.
- [40] D. L. Milles en P. E. Reinke, „Mechanical throttle body injection apparatus”. U.S. Patent 4.206.735, 1980.
- [41] G. Mesenich, H. Bart en D. E. Alsbrook, „Multi-point fuel injection apparatus”. U.S. Patent 4.708.117, 1987.
- [42] P. Dawson, „Direct petrol Injection - A little History,” [Online]. Available: [members.iinet.net.au/~pauldawson/IAME44-2\\_DI-hist.pdf](http://members.iinet.net.au/~pauldawson/IAME44-2_DI-hist.pdf). [Geopend 12 April 2013].
- [43] S. Bennett, *Modern Diesel Technology: Diesel Engines*, U.S.: Delmar, 2010.
- [44] L. H. Weinand, „Fuel rail”. U.S. Patent 4.601.275, 1986.
- [45] T. G. Elphick, E. S. Eshleman en M. J. Field, „Common rail Assembly”. U.S. Patent 4.510.909, 1984.
- [46] Robert Bosch GmbH, „Specials 15 years of Common Rail Systems,” 2013. [Online]. Available: <http://www.bosch-automotivetechnology.com>. [Geopend 13 April 2013].
- [47] E. J. Hayes, „Piezoelectric controlled common rail injector of piezoelectric stroke”. U.S. Patent 5.779.149, 1998.
- [48] A. L. W. Williams, „Piezoelectric fuel injector”. U.S. Patent 3.194.162, 1965.
- [49] J. M. Clarke en J. J. Faletti, „Engine operation using fully flexible valve and injection events”. U.S. Patent 5.117.790, 19 Februari 1991.
- [50] T. Stenhede, „A heat and power co-generation plant”. Patent EP 0281535, 25 februari 1988.
- [51] H. Cornelius, China Patent CH560318, 27 maart 1975.
- [52] DieselNet, „Emission Standards European Union,” September 2012. [Online]. Available: <http://www.dieselnet.com>. [Geopend 16 April 2013].
- [53] S. M. Kerstein, S. C. Simmons, B. A. Dunn en D. M. Grider, U.S. Patent 5.483.936, 1994.
- [54] M. Akasu, „Method for reducing knocking in internal combustion engine”. Japan Patent 4.903.210, 1985.
- [55] K. Kamise en S. Yamamoto, „Knocking control system for internal combustion engine”. Japan Patent 4.858.580, 1988.
- [56] C. Gonzalez, „Axial cylinder internal combustion engine”. U.S. Patent 5.094.195, 1992.
- [57] H. Berthold, „Axial piston engine with a cooling circuit for the cylinders and pistons”. Germany Patent EP0767864 B1, 1998.
- [58] R. Libralato, Italy Patent US 2011/0186006, 2009.
- [59] B. D. Howell-Smith, „Opposed piston combustion engine”. Australia Patent 5.992.356, 1999.
- [60] S. C. Scuderi en D. P. Branyon, „Split-Cycle Engine With dwell Piston motion”. U.S. Patent 6.986.329, 2006.
- [61] S. C. Scuderi en D. P. Branyon, „Split-cycle engine with dwell piston motion”. U.S. Patent 7.121.236, 2006.
- [62] S. C. Scuderi en S. P. Scuderi, „Split-Cycle air hybrid Engine”. U.S. Patent 7.353.786, 2008.
- [63] S. C. Scuderi en S. P. Scuderi, „Split-Cycle Air Hybrid Engine”. U.S. Patent 7.603.970, 2009.
- [64] T. Aoyama en Y. Oshima, „Direct Injection Type Internal Combustion engine”. Japan Patent 4.641.617, 1987.
- [65] H. Yamasaki, K. Yagi, K. Tsukamoto, T. Takaoka en T. Fukuma, „Lean burn internal combustion engine”. Japan Patent 5.190.008, 1992.
- [66] S. Asano, T. Atago en N. Kurihara, „Lean burn control method and device for internal combustion engine and fuel injection quantity control method and device including same”. Japan Patent 5.447.137, 1993.
- [67] M. M. Gasim, L. G. Chui en K. A. b. Anwar, „Experimental study on revetec engine cam performance,” *Materials Science and Engineering* 36, p. 6, 2012.
- [68] M. M. Gasim, A. K. Amiruddin en A. Shahrani, „A Computational comparison between Revetec engine and conventional internal combustion engines on the indicated torque,” *World Academy of Science, Engineering and Technology* 76, p. 3, 2011.
- [69] Revetec Leading Engine Technology, „Revetec Technology,” 2011. [Online]. Available: <http://www.revetec.com>. [Geopend 31 Maart 2013].



## 8 BIJLAGE

### Bijlage 1: Overzicht componenten Bosch Engine Management System [20].



### Bijlage 2: Evolutie Europese emissiewetgeving sinds 1992 [52].

Stage	Date	CO	HC	HC+NOx	NOx	PM	PN
		g/km					#/km
Compression Ignition (Diesel)							
Euro 1†	1992.07	2.72 (3.16)	–	0.97 (1.13)	–	0.14 (0.18)	–
Euro 2, IDI	1996.01	1.0	–	0.7	–	0.08	–
Euro 2, DI	1996.01 <sup>a</sup>	1.0	–	0.9	–	0.10	–
Euro 3	2000.01	0.64	–	0.56	0.50	0.05	–
Euro 4	2005.01	0.50	–	0.30	0.25	0.025	–
Euro 5a	2009.09 <sup>b</sup>	0.50	–	0.23	0.18	0.005 <sup>f</sup>	–
Euro 5b	2011.09 <sup>c</sup>	0.50	–	0.23	0.18	0.005 <sup>f</sup>	6.0×10 <sup>11</sup>
Euro 6	2014.09	0.50	–	0.17	0.08	0.005 <sup>f</sup>	6.0×10 <sup>11</sup>
Positive Ignition (Gasoline)							
Euro 1†	1992.07	2.72 (3.16)	–	0.97 (1.13)	–	–	–
Euro 2	1996.01	2.2	–	0.5	–	–	–
Euro 3	2000.01	2.30	0.20	–	0.15	–	–
Euro 4	2005.01	1.0	0.10	–	0.08	–	–
Euro 5	2009.09 <sup>b</sup>	1.0	0.10 <sup>d</sup>	–	0.06	0.005 <sup>e,f</sup>	–
Euro 6	2014.09	1.0	0.10 <sup>d</sup>	–	0.06	0.005 <sup>e,f</sup>	6.0×10 <sup>11</sup> e,g

<sup>a</sup> At the Euro 1..4 stages, passenger vehicles > 2,500 kg were type approved as Category N<sub>1</sub> vehicles  
<sup>†</sup> Values in brackets are conformity of production (COP) limits  
<sup>a</sup>. until 1999.09.30 (after that date DI engines must meet the IDI limits)  
<sup>b</sup>. 2011.01 for all models  
<sup>c</sup>. 2013.01 for all models  
<sup>d</sup>. and NMHC = 0.068 g/km  
<sup>e</sup>. applicable only to vehicles using DI engines  
<sup>f</sup>. 0.0045 g/km using the PMP measurement procedure  
<sup>g</sup>. 6.0×10<sup>12</sup> 1/km within first three years from Euro 6 effective dates

**Bijlage 3: Zoeksleutel innovaties per patent.**

Innovatie	Uitvinder	Patentnummer	bron
<b>Klopsensor</b>	Böning, et al.	US 4.446.723	[13]
	Hamisch, et al.	US 4.383.434	[15]
	Keem	US 4.254.354	[12]
	Kerstein, et al.	US 5.483.936	[53]
	Akasu	US 4.903.210	[54]
	Kamise, et al.	US 4.858.580	[55]
<b>Engine Management System</b>	Jeenick, et al.	US 4.250.858	[17]
	Wunning, et al.	US 5.201.296	[18]
	Netherwood	US 5.605.135	[19]
<b>DUKE motor</b>	Gonzalez	US 5.094.195	[56]
	Berthold	EP 0767864	[57]
<b>Thermodynamische warmte-energie recuperatie</b>	Battaglini	US 4.913.098	[23]
	Kriessl, et al.	US 4.394.582	[27]
	Stenhede	EP 0281535 A1	[50]
<b>Turboverbrandingsmotor</b>	Yadegar	US 7.451.738	[28]
<b>Libralato motor</b>	Libralato R.	WO 2004/020791	[31]
	Libralato R.	US 2011/0189006	[58]
<b>Revetec motor</b>	Howell-Smith	US 5.992.356	[59]
<b>Alvar-cyclus &amp; Hefley motor</b>	Hefley	US 7.270.092	[35]
	Gustavsson	US 5.188.066	[33]
<b>Scuderi Split-cycle motor</b>	Scuderi, et al.	US 6.986.329	[60]
	Scuderi, et al.	US 7.121.236	[61]
	Scuderi, et al.	US 7.353.786	[62]
	Scuderi, et al.	US 7.603.970	[63]
<b>Injectiesysteem</b>	Milles, et al.	US 4.206.735	[40]
	Mesenich, et al.	US 4.708.117	[41]
	Elphick, et al.	US 4.510.909	[45]
	Weinand	US 4.601.275	[44]
	Aoyama, et al.	JP 4.641.617	[64]
	Yamasaki, et al.	JP 5.190.008	[65]
	Asano, et al.	JP 5.447.137	[66]

**Bijlage 4: Scorende klassencombinaties zonder relevante inhoud.**

Innovatie	Klasse 1		Klasse 2	
<b>DUKE motor</b>				
<b>51461463</b>	F01B3	Reciprocating-piston machines	F16B37	Nuts or like thread-engaging members
<b>Injectiesysteem</b>				
<b>53811291</b>	F02M69	Low-pressure fuel-injection apparatus	B23B27	Tools for turning or boring machines
<b>53811291</b>	F02M63	Other fuel-injection apparatus having pertinent characteristics	B23B27	Tools for turning or boring machines
<b>53811291</b>	F02M55	Fuel-injection apparatus characterised by their fuel conduits or their venting means	B23B27	Tools for turning or boring machines
<b>53811291</b>	F02M51	Fuel-injection apparatus characterised by being operated electrically	B23B27	Tools for turning or boring machines
<b>53811291</b>	F02M69	Low-pressure fuel-injection apparatus	E03D3	Flushing devices operated by pressure of the water supply system
<b>53811291</b>	F02M55	Fuel-injection apparatus characterised by their fuel conduits or their venting means	E03D3	Flushing devices operated by pressure of the water supply system
<b>50671768</b>	F02M55	Fuel-injection apparatus characterised by their fuel conduits or their venting means	C08J9	Working-up of macromolecular substances to porous or cellular articles or materials
<b>50671768</b>	F02M69	Low-pressure fuel-injection apparatus	F16L43	Bends; Siphons
<b>50671768</b>	F02M55	Fuel-injection apparatus characterised by their fuel conduits or their venting means	F16L43	Bends; Siphons
<b>52129564</b>	F02B75	Other engines, e.g. single-cylinder engines	A47F3	Showcases or show cabinets
<b>52129564</b>	F02B3	Engines characterised by air compression and subsequent fuel addition	A47F3	Showcases or show cabinets
<b>52129564</b>	F02B23	Other engines characterised by special shape or construction of combustion chambers to improve operation	A47F3	Showcases or show cabinets
<b>Turbomotor</b>				
<b>53828876</b>	F02B73	Combinations of two or more engines, not otherwise provided for	F01C19	Sealing arrangements in rotary-piston machines or engines
<b>53828876</b>	F02B73	Combinations of two or more engines, not otherwise provided for	F01C21	Component parts, details, or accessories
<b>Scuderi motor</b>				
<b>54031068</b>	F02B33	Engines characterised by provision of pumps for charging or scavenging	B21C51	Measuring, gauging, indicating, counting, or marking devices specially adapted for use in the production or manipulation of material
<b>54031068</b>	F02B33	Engines characterised by provision of pumps for charging or scavenging	B21B1	Metal rolling methods or mills for making semi-finished products of solid or profiled cross-section
<b>54031068</b>	F02B33	Engines characterised by provision of pumps for charging or scavenging	B21B37	Control devices or methods specially adapted for metal-rolling mills or the work produced thereby



**FACULTEIT ECONOMIE EN BEDRIJFSWETENSCHAPPEN**

Naamsestraat 69 bus 3500  
3000 LEUVEN, BELGIË  
tel. + 32 16 32 66 12  
fax + 32 16 32 67 91  
info@econ.kuleuven.be  
www.econ.kuleuven.be

