

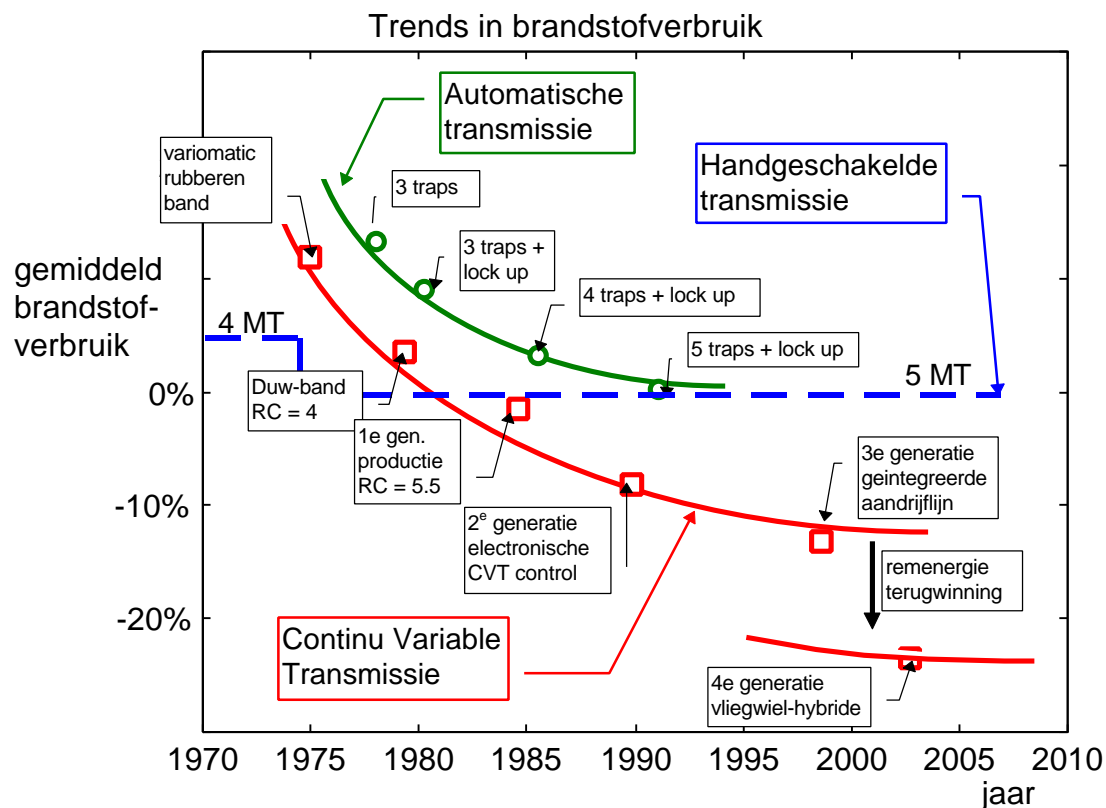
Het EcoDrive voertuig, de ontwikkeling van een geoptimaliseerde aandrijflijn voor personenauto's

E. Spijker
Van Doorne's Transmissie b.v.
Tilburg

1. Inleiding

Het brandstofverbruik in verkeer en vervoer neemt, ondanks maatregelen van diverse overheden, nog steeds toe. De schadelijke emissies vormen een steeds grotere aanslag op ons leefmilieu. In dit paper wordt een technologische oplossing gepresenteerd om het brandstofverbruik en de emissies van voertuigen te verminderen.

Vermindering van het brandstofverbruik van personenauto's door toepassing van de Continu Variabele Transmissie (CVT) vormt de rode draad in de missie van VDT. Dit is geïllustreerd in Figuur 1. Hier is de trend in het brandstofverbruik weergegeven van conventionele automaten (AT) en CVT's ten opzichte van een handgeschakelde 5 traps transmissie (5MT). In deze grafiek zijn twee zaken duidelijk weergegeven. Ten eerste dat conventionele automaten altijd meer brandstof zullen blijven verbruiken dan een handgeschakelde transmissie en ten tweede dat de CVT een lager brandstofverbruik heeft dan de 5MT. In deze figuur is de ontwikkeling van de CVT derde en vierde generatie genoemd. De derde generatie is een verdere ontwikkeling en optimalisatie van de huidige techniek. De ontwikkeling van een vierde generatie CVT wordt gezien als een technologische stap waarbij een hybride aandrijving noodzakelijk is.



Figuur 1. VDT Strategie

De VDT organisatie is in 1972 opgericht met de missie om de technische ontwikkeling en commercialisering van de duwband CVT te realiseren. Uitgangspunt daarbij was een zeer belangrijk basispatent namelijk dat van de duw-band. Een breed gedefinieerd octrooi dat mogelijkheden bood om een gehele bedrijfsactiviteit aan op te hangen. Anno 1996 is dit basispatent verlopen. Terwille van de continuïteit dekt nu een groot aantal octrooien het duwband ontwerp en de productie af. Ook deze octrooien zullen in de toekomst aflopen en het wordt steeds moeilijker om door middel van verfijning van huidige concepten bescherming te blijven garanderen in de zeer concurrerende markt van de autoindustrie.

Om staande te blijven en te kunnen groeien in deze omgeving is een lange termijn ontwikkelingsvisie noodzakelijk. In lijn met de potentie van het CVT systeem ten opzichte van conventionele versnellingsbakken (handgeschakeld of automatisch) is de VDT produktontwikkelingsstrategie gericht op substantiële brandstofbesparing en emissie-verlaging met behoud van soepel rijgedrag en concurrerende prijs.

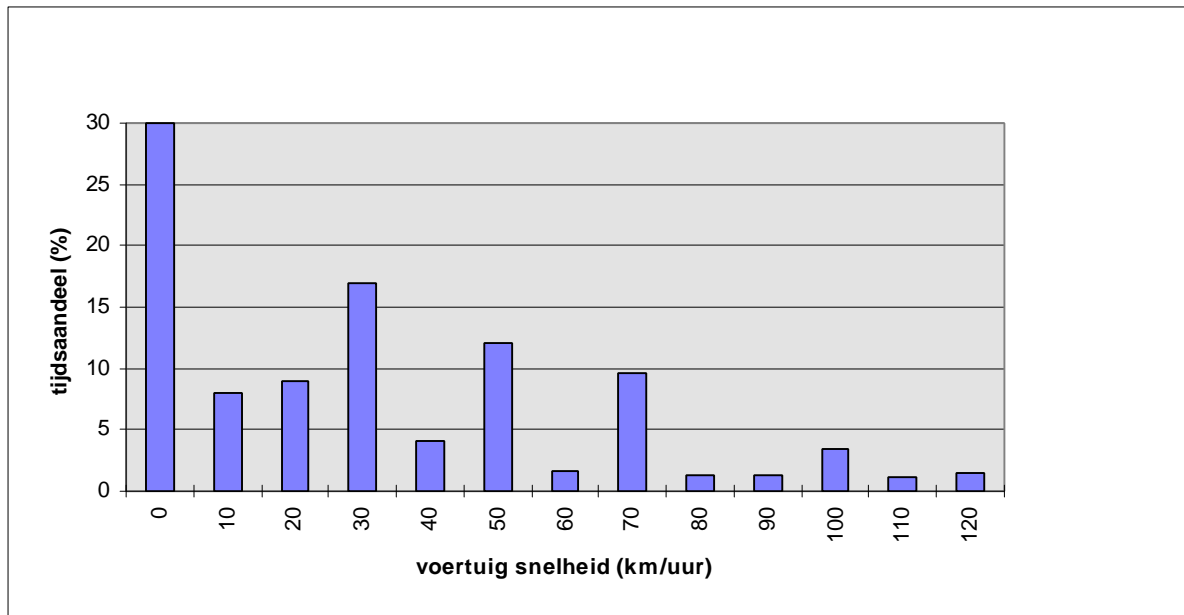
2. Brandstofverbruik en emissie van het voertuig

Om het brandstofverbruik van personenvoertuigen te kunnen verbeteren is een analyse van het lastproces een goed hulpmiddel. Hiermee kunnen de prioriteiten worden vastgesteld en ook het belastingscollectief voor de aandrijving. Als voorbeeld zijn enkele gegevens van een ritcyclus gegeven voor een voertuig van 1150 kg in Tabel 1. De belangrijkste kenmerken zijn de grote spreiding tussen de gemiddelde waarden en de maximum waarden voor de snelheid en het vermogen. De prestaties van het voertuig eisen dat hoge vermogens moeten worden geïnstalleerd die bij normaal stadsverbruik nooit worden aangesproken. Aan deze tegenstrijdige eisen moet door de ontwerper van de aandrijflijn worden voldaan, waarbij het brandstofverbruik als belangrijkste criterium wordt aangenomen.

Tabel 1. Samenvatting van eisen voor het geïnstalleerd vermogen.

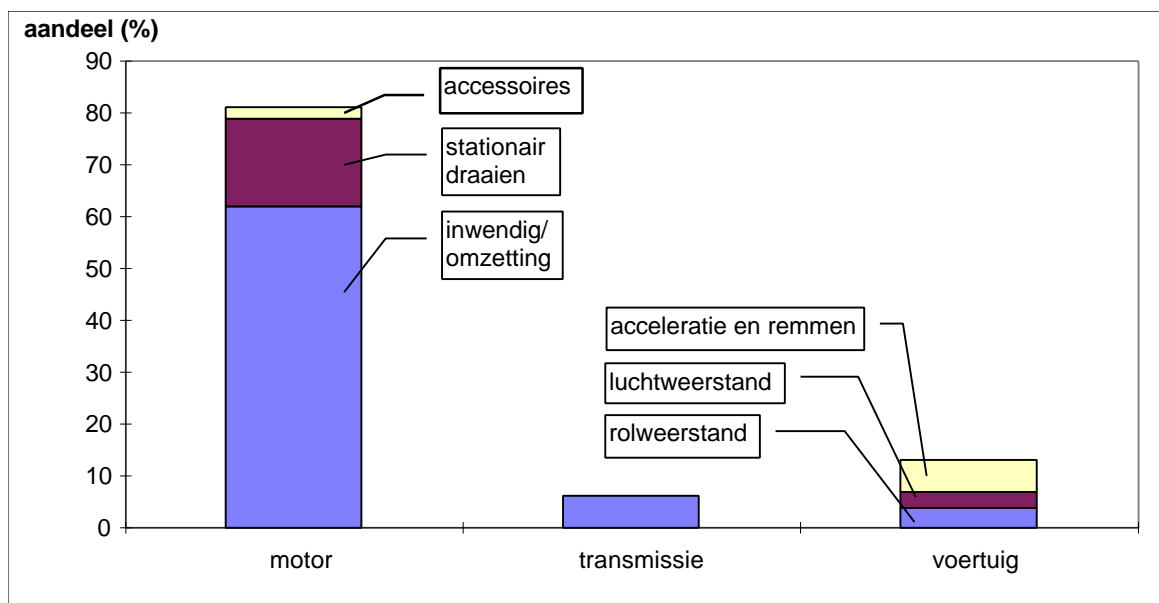
ritcyclus (NEDC)	maximum snelheid	120 km/uur
	gemiddelde snelheid	32 km/uur
	maximum vermogen	32 kW
	gemiddelde vermogen	3.5 kW
prestaties	maximum snelheid	≈190 km/uur
	vermogen voor topsnelheid	≈70 kW
	vermogen voor 0-100 km/uur acceleratie	≈70 kW

Verder is in Figuur 2 de snelheidsverdeling van een voertuig gegeven. Ook hier valt uit af te leiden dat de gemiddelde voertuigsnelheid laag is en dat het voertuig zelfs een substantieel deel van de tijd stilstaat.



Figuur 2. Snelheidsverdeling van een voertuig voor een ritcyclus (NEDC).

Het energieverbruik in huidige aandrijflijnen van voertuigen kan uitgesplitst worden naar het verbruik van een aantal belangrijke componenten. Uit de onderstaande figuur kunnen twee belangrijke conclusies worden getrokken. Als eerste dat de motor de belangrijkste oorzaak is van het hoge brandstofverbruik van voertuigen. Als tweede kan worden geconcludeerd dat verbeteringen aan voertuigzijde relatief weinig opleveren. De taak van een CVT is dan ook het efficiënt benutten van de motor door het aanbod aan motorzijde zo goed mogelijk af te stemmen op de vraag aan voertuigzijde.



Figuur 3. Het energiegebruik van een voertuig verdeeld over de componenten (samen 100%).

Er is door VDT gekozen voor een stapsgewijze ontwikkeling van een schone en zuinige aandrijflijn voor personenvoertuigen. Als eerste stap wordt de vrijheidsgraad, die ontstaat bij de toepassing van een CVT met groot regelbereik, benut om bij het ontwerp van de

verbrandingsmotor tot een maximaal systeemrendement te komen. De uitgangspunten zijn hierbij de voertuigspecificatie zoals in Tabel 2 weergegeven. Bij de tweede stap worden de ontwikkelde technieken en expertise vervolgens aangewend voor de ontwikkeling van een aandrijflijn waarbij met een vliegwiel remenergie kan worden teruggewonnen en de motor dankzij het gebruik van het vliegwiel in het werkgebied van maximaal rendement bedreven kan worden.

Tabel 2. Voertuigspecificaties voor de verschillende concepten.

voertuig specs		otto motor	diesel motor	hybride
massa voertuig		1150 kg	1150 kg	1150 kg
frontaal oppervlak	C_{wA}	0.65 m ²	0.65 m ²	0.65 m ²
rolweerstandscoefficiënt	f_r	0.011	0.011	0.011
acceleratie	0-100 km/uur	10 sec	12 sec	
	80-120 km/uur	10 sec	10 sec	
topsnelheid		190 km/uur	190 km/uur	
brandstofverbruik	tov 5 MT	- 10%	- 5%	- 25%
emissies		Euro 2000	Euro 2000	Euro 2005
kosten aandrijflijn	t.o.v. AT	als AT	als AT	

De driveability, de voertuigresponsie op het gaspedaal, van de vliegwiel-hybride dient vergelijkbaar te zijn met eenzelfde type voertuig met CVT. Ook geldt dat de veiligheid op hetzelfde niveau moet zijn van de huidige geldende standaard.

Tabel 3. Marktsituatie voor personen voertuigen in Nederland.

	1996	2004 e.v.
Verbruik autos uitgerust met huidige CVT	als 5MT	25% zuiniger dan 5MT
wagenpark geschikt voor CVT toepassing	960.000 personenauto's met benzinemotor	<ul style="list-style-type: none"> • 3.250.000 personenauto's met benzinemotor • 275.000 auto's met dieselmotor

Als de reductie in het brandstofverbruik voor de voertuigen wordt geprojecteerd op het nederlandse wagenpark, zie Tabel 3, dan kan een schatting worden gemaakt voor de potentiële brandstofbesparing. Uitgaande van een de marktsituatie, Tabel 3, zijn de volgende perspectieven ten aanzien van brandstofverbruik te verwachten:

Tabel 4. Potentiele brandstofbesparing in Nederland

Potentiele besparing t.o.v. 5MT	1996	2004 e.v.
Benzine (13.300 km/jaar; 14 km/l x 25%)		770 mln. liter/jaar
Diesel (28.000km/jaar; 20 km/l x 25%)		96 mln. liter/jaar

De emissies zullen minimaal moeten voldoen aan de normen zoals die gelden op het moment van het gereedkomen van het hybride voertuig. De verwachte emissie-eisen voor de perioden na 2000 en 2005 zijn, naar voorstel van de Europese commissie, als volgt:

Tabel 5. Verwachte emissie-eisen voor personenvoertuigen.

brandstof	emissie [g/km]	1996	vanaf 2000	vanaf 2005
benzine	CO	2.2	2.2	1.0
	HC + NO _x	0.5	0.35	0.18
diesel	CO	1.0	0.64	0.50
	HC + NO _x	0.9	0.56 (NO _x : 0.50)	0.30 (NO _x : 0.25)
	partikels	0.1	0.05	0.04

Voor het brandstofverbruik en de emissies wordt een voertuig met een handgeschakelde 5 versnellingsbak (5 MT) als referentie genomen. Als belangrijke randvoorwaarden geldt dat de prestaties van het voertuig niet negatief mogen worden beïnvloed. De kosten zijn een belangrijk aspect en de gehele aandrijflijn dient een kostprijs te hebben die vergelijkbaar is met een conventionele automaat (AT).

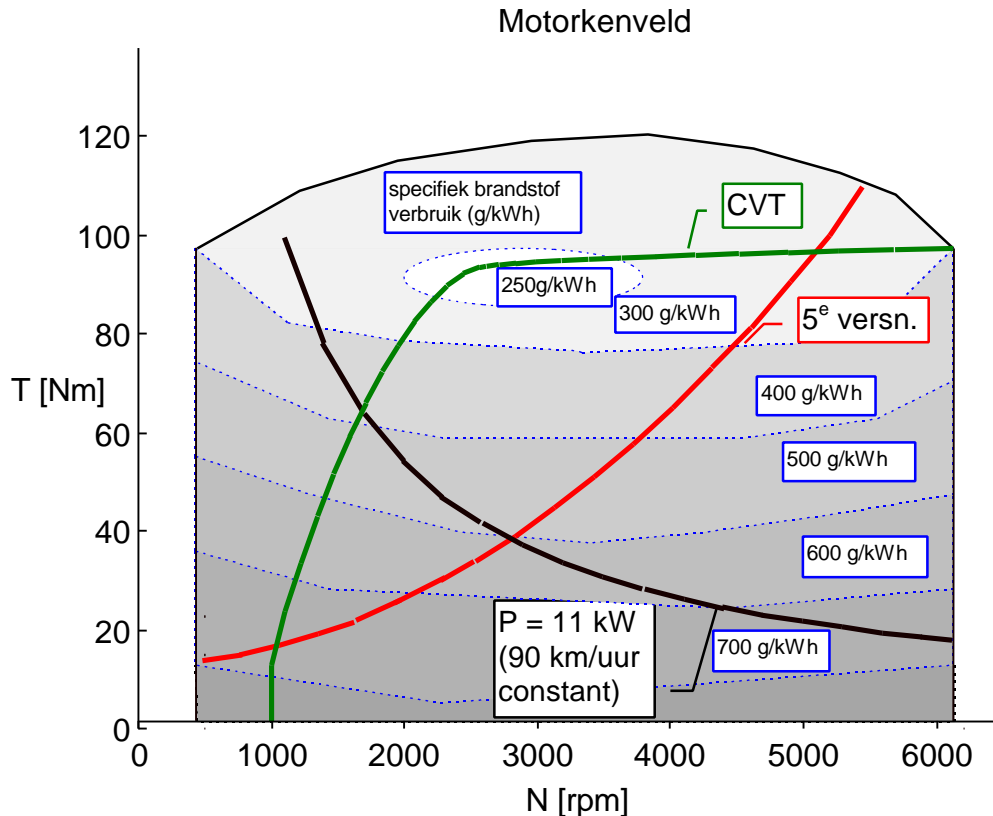
3. Eerste ontwikkelstap: de systeem geïntegreerde aandrijving

3.1. Waarom systeem geïntegreerd?

De huidige motoren zijn geoptimaliseerd voor handgeschakelde transmissies, waarbij een laag brandstofverbruik gepaard gaat met emissies die aan de huidige wettelijke eisen voldoen. Deze optimalisatie is een compromis van allerlei tegenstrijdige eisen tussen brandstofverbruik, emissies, kosten en voertuiggedrag. Het is daarom noodzakelijk eerst de aandrijflijn met verbrandingsmotor en CVT te integreren op systeemniveau. Hierbij wordt vanaf het ontwerpstadium getracht de basiscomponenten, verbrandingsmotor en CVT, nauwkeurig op elkaar af te stemmen. Het einddoel moet een nieuw compromis zijn tussen de voorgenoemde tegenstrijdige eisen waarbij het eindresultaat een substantieel lager brandstofverbruik en lagere emissies oplevert. Omdat de eigenschappen van een otto- en een dieselmotor sterk verschillen, wordt er voor beide motoren typen een systeemoptimalisatie uitgevoerd.

3.2. Waarom CVT?

Het voordeel van een CVT ten opzichte van een handgeschakelde transmissie is het beste te illustreren met behulp van een voorbeeld. In Figuur 4 is de relatie tussen de vermogensvraag van het voertuig, bij een constante snelheid, en de bijbehorende vermogenslijn van de motor gegeven. Bij een gegeven constante voertuigsnelheid van bijvoorbeeld 90 km/uur moet er een vermogen van 11 kW worden geleverd. Voor een gegeven transmissie overbrenging, de 5^e versnelling, ligt het werkpunt van de motor vast op 2700 rpm. Wat hierbij opvalt is dat het werkgebied met een gunstig brandstofverbruik van de motor nooit wordt bereikt.



Figuur 4. De combinatie van motor en CVT levert een 20% gunstiger motorbelasting in vergelijking met een 5MT.

De werking van de CVT kan eenvoudig omschreven worden als een transmissie die een willekeurige overbrenging kan instellen. De CVT onderscheidt zich van een handgeschakelde transmissie door het feit dat er nu altijd de meest gunstige overbrenging kan worden ingesteld over een groter toerenbereik van de motor. Bij het voorbeeld met 90 km/uur voertuigsnelheid kan een 1700 rpm worden ingesteld, dat wil zeggen het werkpunt wordt nu verplaatst naar een lager toerental, op dezelfde vermogenslijn van 11 kW, zie Figuur 4. Het nieuwe werkpunt levert nog steeds hetzelfde vermogen maar met een substantieel lager brandstofverbruik (van 500 g/kWh naar 400 g/kWh oftewel 20% verbruiksreductie). Echter, omdat een CVT een lager rendement heeft dan een handgeschakelde transmissie zal de uiteindelijke brandstofreductie kleiner zijn dan de voorspelde 20%.

Toepassing van een CVT met een groot regelbereik opent ontwerpvrijheden voor de ontwikkelaars van de verbrandingsmotor, doordat de benodigde toerenband wordt verkleind en de motor anders wordt bedreven. Toevoeging van een vliegwiel als energiebuffer maakt het zelfs mogelijk de verbrandingsmotor een groot gedeelte van de tijd in één werkpunt te laten draaien.

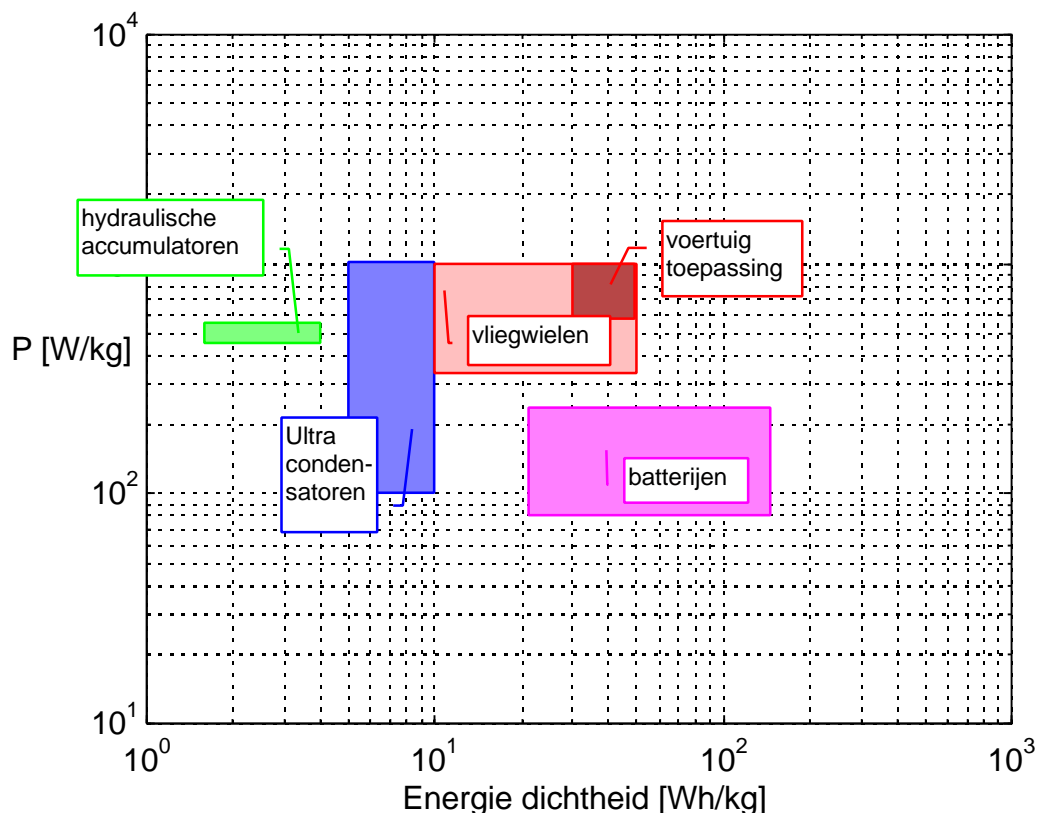
4. Tweede ontwikkelstap: de vliegwiel-hybride aandrijving

Aansluitend op deze ontwikkeling van een systeemgeïntegreerde aandrijflijn vindt de ontwikkeling van een hybride aandrijflijn plaats. Hiervoor wordt één motor verderontwikkeld; onderzoek moet uitwijzen welke hiervoor het meest geëigend is, een benzine- of een dieselmotor. De vliegwielontwikkeling wordt in zijn geheel uitgevoerd door

de TUE, de CVT-ontwikkeling door VDT en de ontwikkeling van het hybride aandrijflijnbesturingssysteem in een samenwerking tussen de TUE en VDT.

4.1. Waarom hybride?

Zoals bij de beschrijving van de systeem geïntegreerde aandrijving al is genoemd, kan het werkpunt van de motor worden verschoven naar een bedrijfspunt met een beter specifiek brandstofverbruik. Het werkpunt met het minimale brandstofverbruik wordt echter niet bereikt. Een mogelijke oplossing hiervoor is het gebruiken van de motor in start-stop bedrijf. Hierbij wordt de motor alleen in het optimale werkpunt bedreven of afgeschakeld. Om dit te realiseren is een energiebuffer nodig om de overmaat van het motorvermogen op te nemen en gedurende langere tijd af te geven aan de wielen als de motor afgeschakeld is. Een tweede toepassingsmogelijkheid van een hybrideaandrijflijn is het terugwinnen van de remenergie van het voertuig. Dit terugwinnen van energie geeft onmiddellijk een besparing op het brandstofverbruik van het voertuig.



Figuur 5. De specifieke energie en de vermogensdichtheid van verschillen systemen.

4.2. Waarom vliegwiel-hybride?

De verschillende technische oplossingen voor de energiebuffer zijn in Figuur 5 weergegeven. Hierbij zijn een aantal criteria van belang:

- de specifieke inhoud en de vermogensdichtheid,
- het systeemrendement,
- de kosten.

Specifieke inhoud en vermogensdichtheid

De specifieke energieinhoud of opslagcapaciteit en de vermogensdichtheid die kan worden bereikt met dit opslagelement, bepaalt of het geschikt is voor tractie toepassingen. Praktisch uitgedrukt is de opslagcapaciteit en de vermogensdichtheid gekoppeld aan de extra massa die aan de aandrijving moet worden toegevoegd. Deze massa is erg nadelig voor het brandstofverbruik van een voertuig. Een vuistregel is dat 10% additionele voertuigmassa ook 10% extra brandstofverbruik oplevert. Als we de eisen voor toepassingen in voertuigen betrekken in de beoordeling dan volgt hieruit dat alleen vliegwiel geschikt zijn.

Systeemrendement

Een ander criterium waaraan moet worden voldaan is een hoog systeemrendement. Als het vermogen door een motor wordt geleverd, eerst in de energiebuffer wordt opgeslagen om vervolgens naar de wielen te worden getransporteerd, mogen er geen grote verliezen optreden. Dit kan worden samengevat als het rendement van het gehele systeem. Uit meerdere studies komen vliegwiel als de beste kandidaat te voorschijn. De belangrijkste reden hiervoor is dat er in een vliegwiel-CVT combinatie geen energieconversie hoeft plaats te vinden.

Kosten

Als laatste, maar essentieel, criterium zijn de extra kosten die de gekozen technologie met zich meebrengt. Hierbij zijn de materiaalkosten (hfl/kg) doorslaggevend. Deze kosten zijn laag in vergelijking met andere technologieën.

5. Status en vooruitzichten

De ontwikkeling van de aandrijflijnen wordt gefaseerd uitgevoerd waarbij ook nog onderscheid wordt gemaakt tussen de systeemgeïntegreerde aandrijving en de vliegwiel-hybride aandrijflijn. De specificatiefase van de systeemgeïntegreerde aandrijving zal voor het einde van de zomer worden afgerond. De ontwikkeling van de componenten, de CVT en de motor kan dan worden gestart. Volgens planning zullen eind 1998 de componenten gereed zijn en kan de systeem optimalisatie van de gehele aandrijflijn starten. Vervolgens moet eind 1999 het demonstratie voertuig met de geoptimaliseerde aandrijflijn gereed zijn.

De ontwikkeling van de vliegwiel-hybride volgt twee jaar na de systeem geïntegreerde aandrijflijn, deze zal dan begin 2002 gereed zijn.

6. Samenwerking met partners binnen het EcoDrive project

Het project wordt uitgevoerd door een samenwerkingsverband bestaande uit de partijen: VDT, TNO en TUE. VDT is verantwoordelijk voor de algehele projectcoördinatie, de ontwikkeling van de CVT en het aandrijflijnbesturingssysteem. TNO neemt de ontwikkeling van de benzinemotor en de dieselmotor voor zijn rekening, terwijl de TUE zal zorgdragen voor de ontwikkeling van het vliegwiel en het aandrijflijnbesturingssysteem voor de hybride aandrijflijn.

Het gehele project wordt financieel ondersteund door het ministerie van Economische zaken in het kader van de EET subsidieregeling.

7. Samenvatting

Om een lange termijn doelstelling te realiseren wordt er een stapsgewijze ontwikkeling in gang gezet. Hierbij wordt door middel van een samenwerkingsverband met kennis instituten, namelijk TNO en de TUE, gewerkt naar een gezamenlijke einddoel. Dit einddoel is het realiseren van een vliegtuig-hybride voertuigaandrijving met een 25% brandstofverbruiksreductie in het jaar 2002.