

**Auto & Motor  
TECHNIEK**

© **WWW.AMT.NL** - Dé internetsite voor de Automotive Professional

## Crossplane: 90° verzette kruktappen

# Goochelen met verbrandingsafstand

De YZF-R1 van Yamaha is niet 'zomaar' een supersportmotorfiets. In het krachtige blok treffen we een zogeheten crossplane-krukas aan. Hier staan de kruktappen onder hoeken van 90°. Het levert een ongewone ontstekingsvolgorde en verbrandingsafstand op met als resultaat een optimale gasrespons en trillingsvrije loop. Een leerzaam lesje krukastechniek.



Het motorblok van de Yamaha YZF-R1 is heel compact gebouwd. Uit 998 cm<sup>3</sup> wordt 134 kW bij 12.500 t/min gehaald. De hoogste gemiddelde effectieve druk bedraagt maar liefst 14,6 bar bij 10.000 t/min. Niet te zien op deze foto is de ongebruikelijke 'crossplane'-krukas.

We beginnen in 1962. Toen waren de constructiekeningen klaar van Peter Kuhn. De motor die hij ontworpen had, was bedoeld om de zijspancombinatie van Helmut Fath aan te drijven. De mannen in het dorp URSenbach zorgden voor een ommekeer in de motorbouw, want de krukas van de URS-viercilinder heeft een zeer ongewone vorm. Twee tweecilinder krukassen zijn via een hulpas gekoppeld. Het meest opvallende is echter dat de kruktappen hoeken van 90° met elkaar maken. Ze staan van opzij gezien in een kruisvorm, vandaar de naam 'crossplane' die Yamaha later aan zo'n krukasmodel heeft gegeven.

Deze krukasvorm zorgt er, samen met de gekozen primaire overbrenging, voor dat de motor hoge toerentallen kan draaien tot 15.000 t/min bij terugschakelen. Dat is nodig om voldoende vermogen uit de tweekleppenmotor te halen. Begin 1963 loopt de eerste motor, in 1967 pas volgt de eerste wegrace-overwinning. Het jaar daarop gebeurt het bijzondere: het wereldkampioenschap is binnen. En dat met een eigenbouwmotor en zijspan.

Voor het eerst draait een viercilinder in lijn met een verbrandingsafstand van 90°-180°-270°-180°. De bijzondere motor raakt echter in de vergetelheid tot in 1995 de geschiedenis zich herhaalt.

### TRX 850 met 270° krukas

In dat jaar komt er een 850 cm<sup>3</sup> tweecilinder lijnmotor uit met een krukas waarbij de kruktappen 90° verzet zijn. Precies zoals de linker krukas van de URS. Er zijn twee balansassen



Dit is de beroemde 270° krukas zoals die voor het eerst in een serieproductiemotor is toegepast. We kijken er in rijrichting naar, de primaire aandrijving zit rechts en cilinder 1 links. De krukas draait in dezelfde richting als de wielen, dus 'voorover'. De ontstekingsvolgorde is 1-3-2-4 met als verbrandingsafstand 270°-180°-90°-180°.



Het drijfwerk is zo licht mogelijk uitgevoerd. De 78 mm zuiger is als 'slipper piston' geconstrueerd. Er zijn 'gewoon' drie zuigerveren toegepast. De slanke gesmede drijfstang wordt in het hoge toerengebied voornamelijk op trek belast in het klep-overlap BDP. Het grote oog is hydraulisch gebroken om de kap perfect te centreren.

voor- en achter de krukas geplaatst en er is geen secundaire balansas (zie het kader op de volgende pagina's). Omdat voor de verbrandingsafstand tussen de cilinders 1 en 2 geen 90°, maar 270° gekozen is, spreekt Yamaha van een 270° krukas. Tussen de cilinders 2 en 1 zit 450°, samen 720° zoals dat hoort bij een viertakt. Misschien is het meest waarneembare aan de TRX 850 het geluid. Dat lijkt op dat van een 90° V-twin zoals die van Moto Guzzi of Ducati. De



Yamaha gebruikt een inlaatsysteem met variabele lengte. Een stelmotor zorgt voor de beweging van het bovenste deel. Als dat omlaag is, ontstaat er een grote inlaatlengte. Is het bovendeel omhoog gebracht, ontstaat er een kleine inlaatlengte omdat de lucht vooral van opzij wordt aangezogen.



Yamaha-technici willen met deze motor een aantal eisen en wensen tot een geslaagd compromis brengen. Een tweecilinder in lijn bouwt licht en compact, er is immers maar één cilinderkop en één cilinderblok. Dankzij de 270° krukas reageert de motor snel op gashendelbewegingen (zie kader) en het geluid is als dat van een V-twin met een 90° V-hoek. De TRX 850 heeft pas dit jaar een waardige opvolger gekregen in de gedaante van de XT1200Z Super Ténère. Het motorontwerp is vrijwel gelijk gebleven aan dat van de kleinere voorganger en dat zegt veel over de kwaliteit van het 15 jaar oude idee. Maar de Yamaha-technici hebben niet stil gezeten, integendeel. Hun grootste troef is begin 2004 op de racecircuiten verschenen: de MotoGP-viercilinder YZR-M1.

### Racen met Yamaha YZR-M1

Valentino Rossi krijgt een geheel nieuwe viercilinder MotoGP-racer tot zijn beschikking. Tot die tijd reed hij met een 'gewone' vier-in-lijn, dus met een vlakke krukas. Het nieuwe ontwerp heeft de krukassen onder een hoek van 90°. Na 41 jaar klinkt voor het eerst weer het ongewone geluid van zo'n motor op de circuits. Zeker vier verschillende krukasvormen werden getest. Ze hebben niet alleen elk een eigen geluid, maar ook een eigen rijgedrag. Het gaat er om de respons op het gasgeven en dichtdraaien zo beheersbaar mogelijk te maken. Ook het motorkoppel in het middentoeengebied moet zo hoog mogelijk zijn. De achterband heeft grote moeite om de 240 pk over te brengen op het wegdek. De controle



## MOTORFIETSEN

Yamaha YZF-R1 met ongewone krukas



Bij de nieuwe R1-motor liggen de cilinders 31° voorover, 9° minder dan bij het vorige model. De motor is 12 mm naar voren verplaatst om meer gewicht op het voorwiel te krijgen. De achternok scharniert enkele mm's lager in het frame. Deze twee maatregelen zorgen ervoor dat het voorwiel minder ver omhoog komt bij accelereren en de druk op het achterwiel toeneemt.

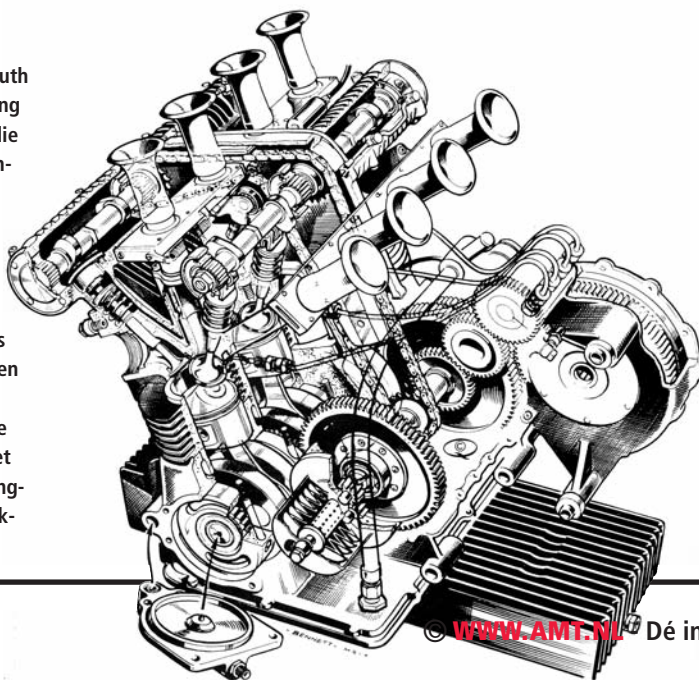
op het driften vooral op een vochtig wegdek is bijna onmogelijk. Vandaar ook de talrijke uitlaatsystemen.

De 'crossplane'-krukas draagt veel bij aan het verminderen van deze problemen, tegenwoordig komt de elektronica de berijders te hulp. De ongewone verbrandingsafstand van de crossplane-krukas werkt door tot het achterwiel. Een gewone viercilinder zal bij 8000 t/min en 160 km/h 12 positieve pulsen gedurende 22,5° afgeven, steeds gevolgd door een negatieve puls van 7,5°. De 90° verzette krukappen en het lichte vliegwiel zorgen voor slechts 6 positieve pulsen van 37,5°, gevolgd door een negatieve puls van 22,5°. Volgens de bandentechnici

en Rossi zelf is dat een betere verdeling van pulsen dan de gebruikelijke. Maar er is nog iets. De nieuwe racemotor draait 'achterover' dus tegengesteld aan de draairichting van de wielen. Daarmee wordt het gyroscopische effect van de wielen tegengewerkt. Dat betekent dat de motor zich makkelijker laat 'omgooien'. Alleen moet je dan Rossi heten om er mee om te kunnen gaan. Wat verder nog wordt beïnvloed is het omhoogkomen van de voorkant tijdens het accelereren. De 'wheelies' blijven beperkter en dat zorgt voor een betere beheersbaarheid van de motor tijdens het uitaccelereren van een bocht. Omdat de elektronica inmiddels zover gevor-

De 500 cm<sup>3</sup> motor van Helmuth Fath fungeerde als aandrijving van een zijspancombinatie die in 1968 het wereldkampioenschap behaalde.

Hoe langer je naar de tekening kijkt, des te meer details er opvallen. Er zijn twee aparte tweecilinder krukassen die links en rechts in een tunnelcarter geschoven zijn. Elke krukas drijft een hulpas aan die met het halve krukastoerental draait. In het midden daarvan zit de kettingaandrijving van de beide nokkenassen.



## Verbrandingskracht

Er werken tijdens het ronddraaien van een krukas drie verschillende krachten op de drijfstaaf van een viertaktmotor. Aangezien de drijfstaaf de krukas doet draaien, hebben de drie krachten dus ook invloed op het koppelverloop van de krukas. De drie krachten zijn: de gaskracht, de traagheidskracht en de wrijvingskracht. De wrijvingskracht verandert met de zuigersnelheid en hangt af van nog een paar zaken. We hoeven ons over de grootte van de wrijvingskracht niet zo druk te maken, want hij is veel kleiner dan de andere twee krachten.

De verbrandingskracht op de drijfstaaf ontstaat door de gaskracht die op de zuiger staat. De gaskracht hangt af van het meer of minder ver opendraaien van de gashendel. Tijdens het comprimeren van het mengsel ondervindt de krukas weerstand. Het kost dan moeite de zuiger omhoog te bewegen. Tijdens de verbranding krijgt de drijfstaaf een stevige duw die de krukas doet ronddraaien. De traagheidskracht op de drijfstaaf ontstaat door het bewegen van de zuiger vanuit de dode punten. De krukas draait daardoor niet gelijkmatig rond, maar hij vertraagt en versnelt steeds.

Als we de verbrandingskracht en de traagheidskracht bij elkaar optellen, kunnen we het echte koppelverloop aan de krukas uitrekenen. Daarbij moeten we rekening houden met de stand van de drijfstaaf ten opzichte van de kruktaaf. Bij ongeveer 80° na het BDP staat de drijfstaaf loodrecht op de lijn die door het hart van de krukas en de krukpen gaat.

### Vliegwieleffect

Het vliegwiel is nodig om de krukas draaiende te houden bij lage toerentallen. Omdat het koppelverloop per twee omwentelingen (we praten nog steeds over een viertakt) zo onregelmatig is, zal de krukas stoppen zodra de zuiger het mengsel moet comprimeren. Daarom wordt in het vliegwiel een deel van de energie 'opgeslagen' die de krukas tijdens de verbranding toegevoerd krijgt. Grote één-cilinders draaien langzaam en hebben daarom een groot vliegwiel nodig. Bij hoge toerentallen zorgt de krukas zelf voor voldoende vliegwieleffect. Er is dan alleen een klein vliegwiel nodig om de motor rustig stationair te laten draaien.

### Staande tweecilinder

Tweecilinder in lijn motoren zijn meestal uitgevoerd met twee krukastypen: één waarbij de kruktaffen in dezelfde stand naast elkaar staan of één waarbij de kruktaffen hoog en laag naast elkaar staan. Het eerste type krukas wordt aangeduid als een 360° krukas, het

# en traagheidskracht

tweede type als een 180° krukas.

Yamaha heeft er sinds 1995 nog een nieuw type krukas aan toegevoegd: de 270° krukas. Dat is een krukas waarbij de tweede kruktaap 90° verzet staat ten opzichte van de eerste kruktaap. De aanduiding 270° komt vanwege de verbrandingsafstand tussen de beide cilinders. Deze bedraagt 270° gevolgd door een afstand van 450°, samen 720° ofwel twee omwentelingen.

Uit het door Yamaha uitgerekende koppelverloop voor de drie typen tweecilinder motoren blijkt dat de 270° krukas twee stevige zetten geeft aan het vliegwiel en dat het vliegwiel daarna maar weinig afremt. De krukas van zo'n motor kan daarom met een lichter vliegwiel even mooi rondlopen als een motor met een 360° krukas. Een lichter vliegwiel laat zich makkelijker in toerental variëren dan een zwaarder exemplaar. Met andere woorden: een tweecilinder met een 270° krukas reageert sneller op gasgeven en gasloslaten dan eenzelfde motor met een 360° krukas.

**1.** Tijdens de verbranding zorgt de gasdruk op de zuiger dat de krukas wordt rondgedraaid. In het Bovenste Dode Punt (BDP) ontstaat er geen koppel op de krukas omdat de zuiger en de drijfstang in een rechte lijn staan. Tijdens de compressie kost het moeite om de zuiger omhoog te bewegen, vandaar dat de koppellijn dan negatief is.

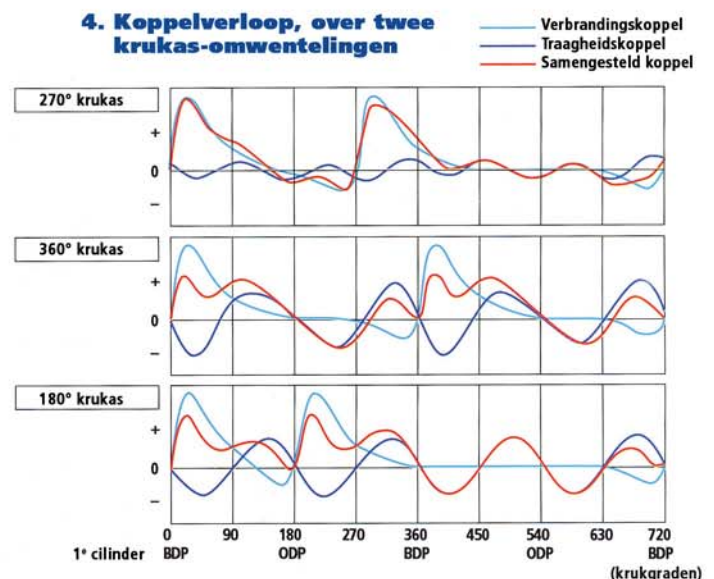
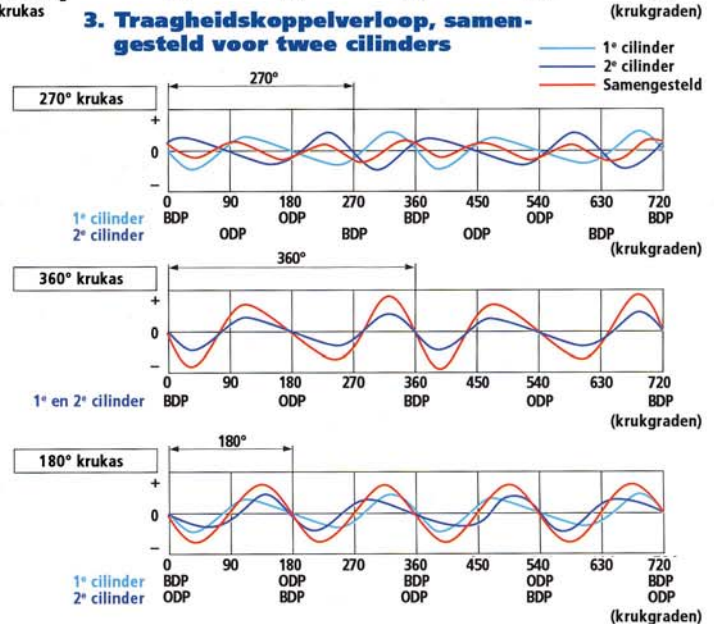
**2.** Het kost moeite om de zuiger op gang te brengen. Vandaar dat er eerst een negatief koppel ontstaat. Is de zuiger eenmaal op snelheid, dan duwt hij de krukas nog even door. Daartoe ontstaat er een positief koppel. Bij ongeveer 80° staat de drijfstang precies haaks op de kruktaap. Dan is de zuigersnelheid maximaal, de zuigerversnelling is daarbij nul.

**3.** Als één krukas twee zuigers op en neer moet bewegen, heeft de stand van de kruktaappen veel invloed op het koppelverloop. De 360° krukas is precies tweemaal een éencilinder, want de zuigers gaan tegelijk op en neer. Bij een 180° krukas lopen de zuigers ongelijk op en neer. Als er één uit het BDP vertrekt, vertrekt de andere uit het ODP. Bij een 270° krukas zoals die van de Yamaha TRX 850 moeten we in de gaten houden dat de kruktaap zelf 270° is verdraaid ten opzichte van die van de eerste cilinder. Uit het samengestelde koppelverloop blijkt dat het minder moeite kost om de krukas rond te draaien dan bij de beide andere krukassen.

**4.** Als we het verbrandingskoppel en het traagheidskoppel van de beide cilinders samenstellen, krijgen we als resultaat het echte koppelverloop aan de krukas tijdens twee omwentelingen. Kijk eerst naar de 360° krukas. Daarbij is te zien dat de verbrandingen elkaar na 360 krukgraden opvolgen. Het samengesteld of resulterend koppelverloop is heel grillig. Bij de 180° krukas komen de verbrandingen met tussenpozen van 180° en 540°. Dat geeft een merkwaardig koppelverloop, met een sterk golvend verloop tijdens de twee slagen zonder verbranding.

Bij de 270° krukas komen de twee verbrandingen goed tot hun recht, er ontstaat een groot positief koppel. Het negatief koppel is kleiner dan bij de andere twee krukastypen. Een 90° V-motor met twee drijfstangen op één kruktaap (Guzzi en Ducati bijvoorbeeld) heeft hetzelfde koppelverloop.

## Koppelverloop in beeld





derd is dat er tijdig wordt ingegrepen als de rijder het te bont maakt, zijn er bij de racemotor van vorig jaar enkele wijzigingen doorgevoerd.

Er is 10% meer vliegwielerwerking dan bij het 2008-model. Het koppel bij deellast is 10% hoger bij dezelfde lucht-brandstofverhouding. De motor kan armer draaien om het brandstofverbruik te beperken. De zuigervorm van de vierkleppenmotor is gewijzigd met als gevolg dat de hoogste materiaaltemperatuur 30°C lager ligt. Een tweevoudige levensduur is mede daardoor bereikt en dat is nodig omdat de motoren betrouwbaarder moeten worden.

Tot het 2009-seizoen werden de wheelies gecontroleerd door het uitveren van de voorvork te meten. Vanaf 2009 wordt ook het gedrag van de achtervork meegenomen, dus geldt de complete standsverandering als maatstaf voor het ingrijpen door het Magneti Marelli-motormanagement.

Het fijne van de krukas en de rest van de YZR-M1 weten we nog steeds niet, maar dat Rossi er goed mee uit de voeten kan, staat vast. Het lag voor de hand dat het succes van de YZR-M1 ook commercieel zou worden benut. Dus verscheen vorig jaar de YZF-R1 op de markt.

## Yamaha YZF-R1: winnende techniek

De nieuwe supersportmotorfiets is uiteraard voorzien van een 'crossplane'-krukas. Van deze krukas zijn wel afbeeldingen beschikbaar, zodat precies te zien is hoe de krukappen zijn geplaatst. Yamaha heeft gekozen voor een ontstekingsvolgorde van 1-3-2-4 met een verbrandingsafstand van 270°-180°-90°-180°.

De voordelen van de crossplane-krukas zijn overduidelijk. De gasrespons en het trillingsvrij draaien maken de YZF-R1-motor tot een winnaar in de vergelijkingstesten.

Er is een opvallend verschil met de raceversie: de krukas draait voorover. Dat zorgt er voor dat de motorfiets een normaal gevoel geeft bij bochtenwerk. Bovendien is er een overbrenging minder, de krukas drijft via de meervoudige natte platenkoppeling rechtstreeks de primaire



# Trillingsvrij draaien

Tijdens het draaien van de krukas ontstaan er twee soorten onbalans: primaire en secundaire. Met primaire (eerste) onbalans worden trillingen bedoeld die met het motortoerental variëren. De secundaire (tweede) onbalans varieert met het tweevoudige motortoerental.

Beide soorten onbalans zijn het gevolg van onvolkomenheden van het kruk-drijfmechanisme. De zuiger gaat immers heen en weer terwijl de krukas ronddraait. Het is niet mogelijk om zonder bijzondere voorzieningen een éencilinder motor trillingsvrij te laten draaien. Er is een balansas nodig die met krukstoerental draait en er is een balansas nodig die met het dubbele toerental draait. Eigenlijk zijn er zelfs vier balansassen nodig. Twee die tegen elkaar in draaien met krukstoerental en twee die eveneens tegen elkaar in draaien, maar dan met het dubbele krukstoerental.

Bij tweecilinder lijnmotoren met een 360° krukas is de balancering gelijk aan die van twee éencilinders bij elkaar opgeteld. Dat

geldt zowel voor de primaire als voor de secundaire onbalans.

Als het om een 180° krukas gaat, is de primaire balancering weliswaar voor elkaar, maar de secundaire nog niet. De secundaire onbalans is echter zo groot als die van de twee cilinders samen. Bovendien is er een balansas nodig om het kantelmoment op te heffen dat door de ongelijke stand van de contragewichten ontstaat. De balansas draait met krukstoerental in tegengestelde richting.

Bij de door Yamaha gebruikte 270° krukas is de secundaire onbalans niet meer aanwezig, maar er blijven nog een primaire onbalans en een kantelmoment over.

De Yamaha-technici gebruiken voor de 270° krukas twee balansassen die voor en achter de krukas liggen en met krukstoerental draaien. Op elke balansas zitten twee gewichten die elk 25% van het contragewicht voor hun rekening nemen. Het contragewicht van de krukas zelf doet met 50% mee om de primaire onbalans op te heffen. Er blijft dus een kantelmoment over.

versnellingsbak aan. Omdat het traagheidskoppel lager is dan dat van een viercilinder met een vlakke krukas, reageert de motor beter op het openen en sluiten van de gaskleppen. Een dure secundaire balansas ontbreekt, daar staat een duurder te fabriceren krukas tegenover. In standaarduitvoering levert de 998 cm<sup>3</sup> vierpitter 134 kW (182 pk) bij 12.500 t/min. De boring bedraagt 78,0 mm, de slag 52,2 mm. Met een compressieverhouding van 12,7:1 en vier kleppen per cilinder wordt er bij 10.000 t/min een hoogste koppel gehaald van 115,5 Nm. Interessant is om de viercilinder te vergelijken met de linker- of rechterbank van een V8 (zie de Bentley V8 in AMT 3/2010). Let eens op de stand van de krukappen, misschien ziet de krukas van Rossi's YZR-M1 er zo uit. Voorlopig nog genoeg voer voor discussie!

## Paul Klaver

De korte wielbasis en de lange achtervork zijn kenmerkend voor de Yamaha YZF-R1. De 4 in 2 in 1 en 2 uitlaat eindigt in twee lichtgewichtdempers. De cilinders 1 en 4 zijn gekoppeld evenals cilinders 2 en 3. In de uitlaat is een metaalkatalysator opgenomen.



Yamaha heeft een opvolger uitgebracht van de sinds 1995 gebouwde TRX 850: de XT1200Z Super Ténère. De constructie van de 270° krukas en de balansassen (er is er ook één achter de krukas) is nagenoeg gelijk aan die van de veel kleinere voorganger.



De 270° krukas van de Yamaha XT1200Z Super Ténère toont de fors uitgevallen middelste kruk-wangen. Die nemen het grootste deel van het totaal aan contragewicht voor hun rekening.