

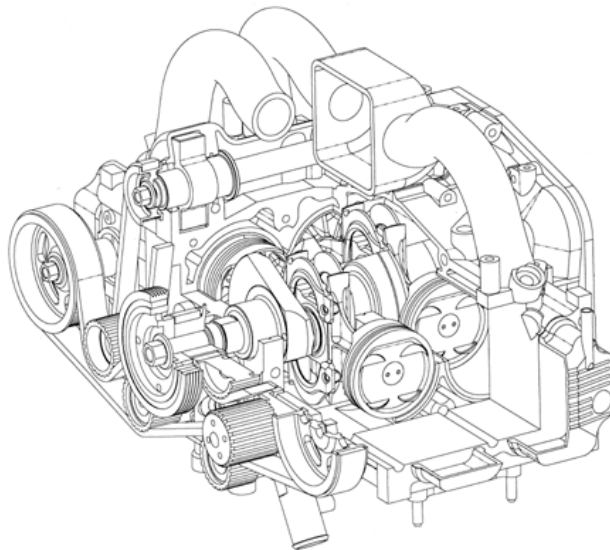
Hans-Günther Rosenkranz

KURBELSCHLAUFENMOTOR ALS KOMPAKTER UND LAUFRUHIGER PKW-ANTRIEB



Dr.-Ing. Hans-Günther Rosenkranz ist Chief Engineer von CMC Research Pty. Ltd. in Melbourne, Australien.

Die Kurbelschleife als Bauelement für die Umwandlung einer linearen in eine kreisförmige Bewegung ist schon seit langer Zeit bekannt. Auch in Verbrennungsmotoren kommt dieses Prinzip in Einzelfällen schon vor. In einem mehrjährigen Forschungsprojekt, durchgeführt an der Universität Melbourne in Australien, wurden jetzt im Vergleich mit einem baugleichen konventionellen Motor die besonderen Vorteile des Kurbelschlaufenmotors der Collins Motor Corporation (CMC) herausgearbeitet. Dabei hat sich herausgestellt, daß diese Bauweise nicht nur sehr kompakt ist, sondern außerdem auch noch beträchtliche Vorteile bezüglich der Laufruhe und Lärmemission bietet. Selbst in Bezug auf den mechanischen Wirkungsgrad, die Stickoxid-Emissionen, die Laufruhe bei sehr niedrigen Leerlaufdrehzahlen und die Gleichförmigkeit der Drehmomentabgabe konnten Vorteile im Vergleich zu dem konventionellen Kurbeltrieb nachgewiesen werden.



1 EINLEITUNG

Boxermotoren haben neben den unbestreitbaren Vorteilen des niedrigen Massenschwerpunkts und der kompakten Bauweise die Nachteile der sehr großen Baubreite und der höheren Kosten mit ihrem gewöhnlich geteilten Kurbelgehäuse. Dies ist wahrscheinlich der Grund, daß nur noch wenige Automobilhersteller weltweit, zum Teil aus Tradition, an der an sich bewährten Bauweise festhalten. Die CMC-Kurbelschlaufenmotoren mit horizontaler Zylinderauslegung vermeiden den Nachteil der großen Baubreite. Sie zeigen vor allem auf dem Gebiet der Laufruhe und Schwingungsarmut, aber auch im mechanischen Wirkungsgrad, Ergebnisse, die von Motoren mit konventionellen Kurbelwellen und Pleueln nicht erreicht werden. Diese und weitere Vorteile auf anderen Gebieten müssen nicht etwa durch höhere Herstellungskosten erkaufte werden, sondern die Kosten für den zusätzlichen Lagerblock und das geteilte Kurbelgehäuse werden durch die Ersparnis an Lagern und Pleuelbolzen mehr als ausgeglichen.

2 DAS LINEARLAGER

Das Kernstück des Kurbelschlaufenmotors, oder des "Scotch-Yoke"-Motors, wie diese Kurbelwellen- und Pleuel-Anordnung im englischen Sprachgebrauch genannt wird, ist der Lagerblock mit den beiden Linearlagern, **Bild 1**. Die beiden fest miteinander verbundenen Pleuelhälften bilden mit ihren parallelen Grundflächen die Gleitbahnen für die

linearen Lagerflächen des Lagerblocks. Der Lagerblock rotiert mit dem Pleuellager auf dem Kurbelkreis um die Kurbelwellenachse. Die beiden Pleuelhälften, fest verschraubt mit ihren Kolben, bewegen sich geführt von den Zylindern entlang der Zylinderachse in einer exakt sinusförmigen Bewegung.

Bei den heute üblichen hohen Verbrennungsdrücken und den im oberen Drehzahlbereich noch höheren Massenträgheitskräften erscheint das Linearlager auf den ersten Blick unpassend für diesen Verwendungszweck zu sein. Die Analyse, der auf das Lager wirkenden Gas- und Massenkkräfte macht jedoch deutlich, daß der kritische Bereich niedriger Gleitgeschwindigkeiten mit dem Nulldurchgang der Massenkkräfte bei 90° , 270° , 450° und 630° Kurbelwinkel zusammenfällt, während die hohen Verbrennungsdrücke und die Massenkraftspitzen nur auftreten, wenn das Lager bei hoher Gleitgeschwindigkeit eine große Tragfähigkeit aufweist, **Bild 2**.

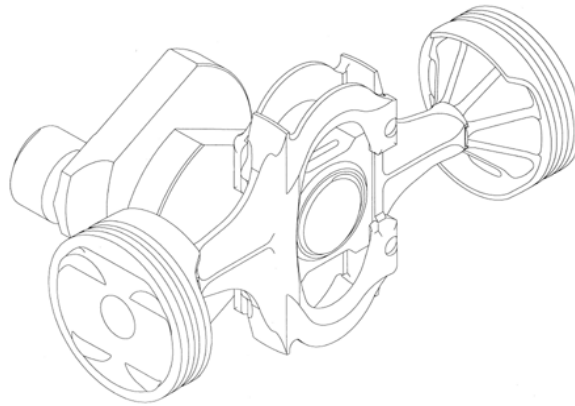


Bild 1: Der CMC Scotch-Yoke-Kurbeltrieb

Fig. 1: The CMC Scotch Yoke mechanism

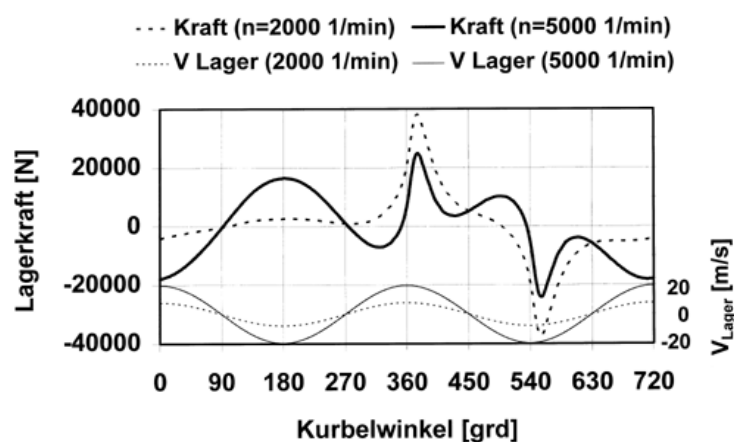


Bild 2: Vollast-Belastung des Linearlagers bei einem Viertakt-Kurbelschlaufenmotor und die Gleitgeschwindigkeit des Lagers

Fig. 2: Linear bearing load of a 4-stroke Scotch Yoke engine at WOT and the linear bearing speed

Die höchsten Kraftspitzen treten auf, wenn bei niedriger Motordrehzahl und hohem Drehmoment der Gaskraft keine hohe Massenträgheitskraft entgegenwirkt. Das Linearlager arbeitet in einer Kombination von hydrostatischer und hydrodynamischer Schmierung. Liegt eine Relativbewegung zwischen den beiden Lageroberflächen vor, bildet sich ein hydrodynamischer Druckberg aus, der um so größer ist je größer der Anstellwinkel des Lagerblocks wird. Wenn dieser Winkel sehr klein oder unter Umständen sogar negativ wird, und wenn die Relativbewegung von Lagerblock und Pleuelfläche klein wird arbeitet das Lager nach dem hydrostatischen Prinzip. Das im Schmierspalt vorhandene Öl wird durch die Lagerbelastung aus dem Lager herausgepreßt. Die Tragfähigkeit wächst dabei mit kleiner werdendem Ölspalt und mit zunehmender Geschwindigkeit der Spaltdicken-Abnahme. Dadurch tritt ein Selbststabilisierungseffekt ein, der verhindert, daß der Schmierspalt zu dünn wird und eine metallische Berührung stattfindet. Die alternierende Lagerbelastung in positiver und negativer Richtung kann ausgenutzt werden, um das Öl gesteuert immer in den unbelasteten oder zumindest niedrig belasteten Lagerspalt zu fördern. Dauerläufe und ausgedehnte Testreihen mit Acht- und Vierzylinder-Prototypmotoren und auf dem Linearlager-Prüfstand von CMC haben gezeigt, das eine metallische Berührung bei geeigneter Auslegung der Schmierölversorgung mit dem erprobten Pleuel- und Lagerdesign ausgeschlossen werden kann.

3 MOTORBAUGRÖSSE

Einer der dominierenden Gründe für die intensive Untersuchung des Scotch-Yoke Prinzips war die mögliche Reduzierung der Baugröße des Motors bei gegebenem Hubraum. Da die Pleuelkomponenten eine ausschließlich lineare Bewegung ausführen, führt das Fehlen jeglicher Bewegung quer zur Zylinderachse dazu, daß die Pleuel sehr kurz sein können. Höhere Kolbenseitenkräfte und damit verbundener Verschleiß oder höhere Vibrationen müssen dafür nicht in Kauf genommen werden. Die erreichbare Verkürzung der Pleuel wird aus **Tabelle 1** deutlich, welche vergleichend die Daten für beide Motorenbauweisen zeigt. Kürzere Pleuel wirken sich direkt auf den Abstand der Pleuel zur Pleuelkopfichtung aus. Dies führt dazu, daß beim CMC-Scotch-Yoke-Motor, **Bild 3**, der doppelte Betrag dieser Verkürzung an Motorbreite im Vergleich zu dem konventionellen Boxermotor gespart werden kann, wenn alle anderen Dimensionen gleich bleiben. Die Länge des Pleuels ist begrenzt durch den notwendigen Abstand zwischen Pleuelkontur und Zylinderlaufbuchse im oberen Totpunkt und durch die minimal notwendige Entfernung des Ölabbstreifings vom unteren Rand der Laufbuchse im unteren Totpunkt. Aber nicht nur die Motorbreite ist beim Scotch-Yoke-Motor reduziert, die Motorlänge ist ebenfalls kleiner als beim normalen Boxermotor, weil gegenüberliegende Pleuel keinen Versatz für die Pleuellager benötigen. Beim Vergleich mit dem ohnehin schon kompakten Boxermotor führt das zu einer Reduzierung des äußeren Motorvolumens ($L \times B \times H$) um mehr als 25 % am Beispiel des CMC 422 Motors und des Boxermotors eines japanischen Automobilherstellers. Beim Vergleich mit den Maßen des Vierzylinder-Reihenmotors eines deutschen Herstellers ist das äußere Motorvolumen beim CMC-Scotch-Yoke-Motor sogar um nahezu 50 % reduziert. Aus Platzgründen werden in Fahrzeugmotoren kurze Pleuellängen angestrebt. Dem sind wegen der damit verbundenen Geräusch-, Reibungs- und Verschleißprobleme allerdings Grenzen gesetzt. Gewöhnlich werden bei konventionellen Motoren für das Verhältnis von Pleuellänge zu Pleuelradius Werte größer als 3,3 angestrebt. Obwohl dieses Verhältnis bei CMC-Scotch-Yoke-Motoren nur 2,6 bis 2,7 beträgt, verhalten sie sich mit ihrer ausschließlich sinusförmigen Pleuelbewegung in Bezug auf Pleuelkräfte und die Form der Pleuelbewegung so, als ob dieses Verhältnis unendlich groß wäre.

Tabelle 1: Daten des Scotch-Yoke-Motors im Vergleich mit konventionellen Motoren

Table 1: Scotch Yoke Engine data in comparison with conventional engines

	Dim.	CMC422 Scotch-Yoke	Boxermotor konventionell	CMC420 Scotch-Yoke	Reihenmotor konventionell
Hubraum	cm ³	2212	2212	1998	1998
Bohrung	mm	96.9	96.9	86.0	86.0
Hub	mm	75.0	75.0	86.0	86.0
Pleuellänge	mm	100.0 (equiv.)	131.0	113.7 (equiv.)	143.0
Pleuelstangenverhältnis	-	0.375	0.286	0.378	0.301
Pleuellänge/Kurbelverhältnis	-	2.67	3.49	2.64	3.33
Blockhöhe (Kurbelwelle bis Pleuelkopfichtung)	mm	172.0	203.0	187.7	219.0
Zylinderabstand	mm	113.0	113.0	93.0	93.0
Zylinderzahl	-	4	4	4	4
Verdichtungsverhältnis	-	9.5 : 1	9.5 : 1		
Ventilsteuerzeiten					
Einlaß öffnet	*KW v.OT	2	2		
Einlaß schließt	*KW n.UT	60	60		
Auslaß öffnet	*KW v.UT	50	50		
Auslaß schließt	*KW n.OT	16	16		
Leistung*)	kW	95	94		
bei Drehzahl	1/min	5500	5500		
Max. Drehmoment*)	Nm	180	183		
bei Drehzahl	1/min	4500	4500		
Max. Drehmoment*) mit ver- längerem Ansaugkrümmer	Nm	196	-		
	1/min	2500	-		
Zündfolge nach DIN	-	1-3-4-2	1-2-3-4		
Motordimensionen (inklusive Ansaug- und Abgaskrümmer)					
- Motorhöhe H	mm	485	485	475	627
- Motorlänge L	mm	319	396	297	559
- Motorbreite B	mm	665	727	668	532
- H x L x B	dm ³	103	140	94	186

*) gemessen mit CMCR Kontrollmodul bei Lambda = 0,95

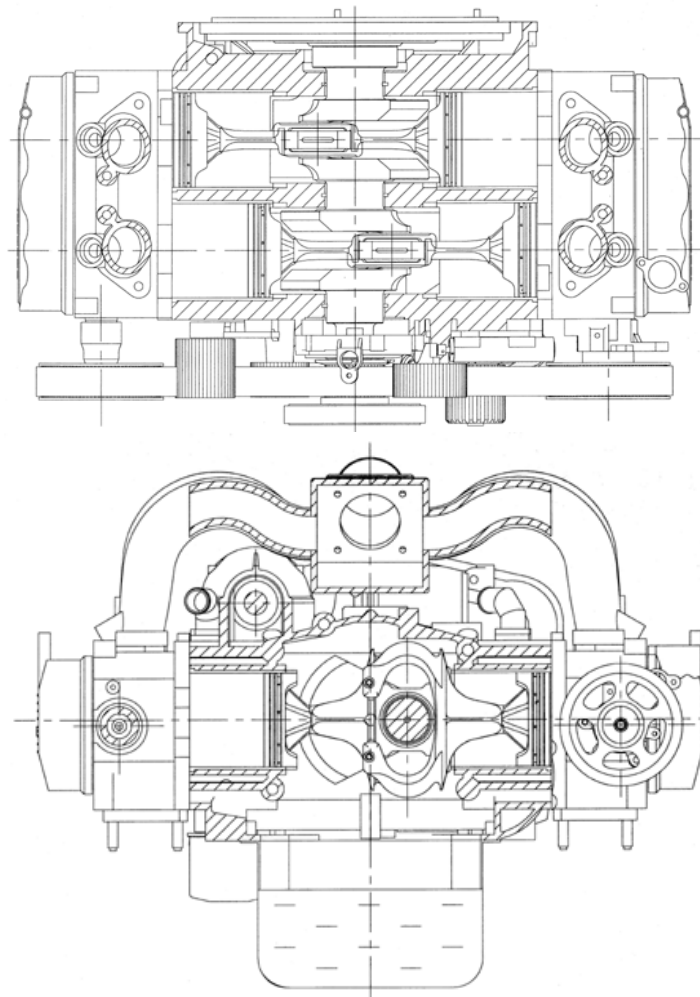


Bild 3: Der 2,2-l-Vierzylinder Scotch-Yoke-Motor CMC 422

Fig. 3: The 2.2 ltr. 4-cylinder Scotch Yoke engine CMC422

Da sich die Masse der Hauptmotorkomponenten auf Höhe der Kurbelwelle befindet, ergibt sich für CMC-Scotch-Yoke-Motoren ein sehr niedriger Gesamtschwerpunkt, der Vorteile für die Straßenlage bei Kurvenfahrt bietet. Die kurze Baulänge und niedrige Bauhöhe des Kurbelgehäuses ermöglicht eine flache Motorhaube für einen guten cw-Wert und relativ große Knautschzonen selbst bei sehr kleinen Automobilen. Im Fall eines Frontalaufpralles kann der Motor unter die Fahrgastzelle gleiten und verkürzt so nicht den - bei kleinen Fahrzeugen nur kurzen - zur Verfügung stehenden Verformungsweg. Die flache Bauweise ermöglicht aber auch in speziellen Fällen die Anordnung des Motors unter der Fahrgastzelle.

Bei zukünftigen Hybridfahrzeugen mit zwei unterschiedlichen Antriebsquellen ist die Kompaktheit des Verbrennungsmotors natürlich noch wichtiger, weil ja zusätzlich auch die elektrischen Komponenten untergebracht werden müssen.

4 VIBRATIONEN UND LÄRM

Nach Fertigstellung des ersten Vierzylinder Scotch-Yoke-Motors, der einen direkten Vergleich mit einem entsprechenden konventionellen Serienmotor zuläßt, wurde bestätigt, daß die kompakte Bauweise nur einer der vielen Vorteile des Scotch-Yoke-Prinzips ist. Obwohl der gewählte konventionelle Vergleichsmotor bezüglich Vibrationen und Lärmemissionen ein sehr hohes Niveau erreicht, wurde er doch durch die Laufruhe des Scotch-Yoke-Motors noch weit übertroffen. **Bild 4** zeigt ein Beispiel für die auf dem Motorprüfstand gemessenen Kurbelgehäusevibrationen beider Motoren im Frequenzbereich bis 400 Hz. Abgebildet sind die Werte für Vollast. Im Teillastbereich und im Leerlauf sieht das Ergebnis ähnlich vorteilhaft für den Scotch-Yoke-Motor aus.

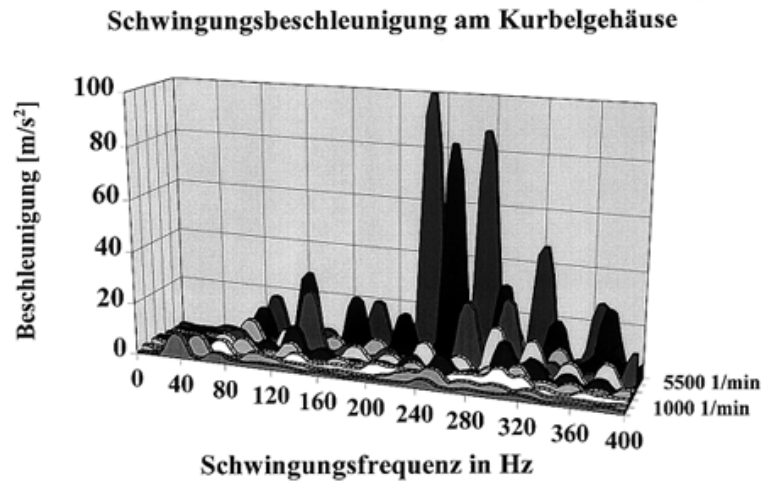


Bild 4a: Kurbelgehäuse-Schwingungen des Boxermotors bei Vollast

Fig. 4a: Crankcase vibrations of the conventional Boxer engine at WOT

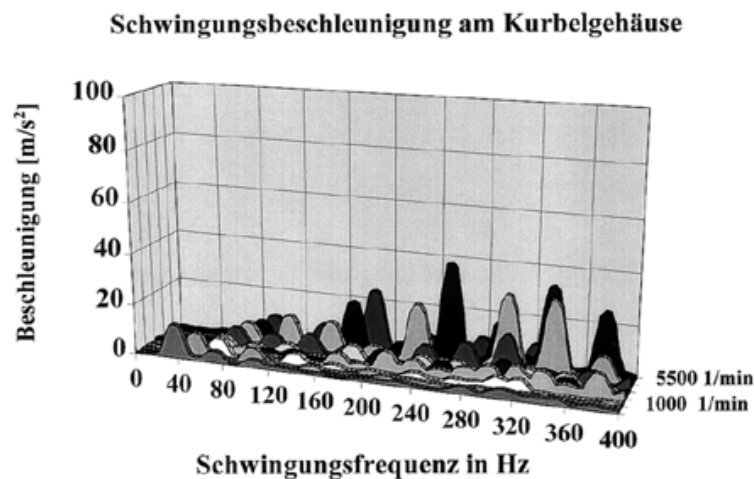


Bild 4b: Kurbelgehäuse-Schwingungen des Scotch-Yoke- Motors bei Vollast

Fig. 4b: Crankcase vibrations of the Scotch Yoke engine at WOT

Da die Kurbelgehäuse der Prototypmotoren im Sandguß hergestellt wurden und deshalb akustisch nicht repräsentativ für Serienmotoren sein können, wurde auf akustische Vergleichsmessungen verzichtet. Der subjektive Eindruck der Lärm-emission der Scotch-Yoke-Motoren auf den Prüfständen bestätigt allerdings die erwartete Geräuscharmheit. Die kurze, steife Bauweise der Kurbelwelle beim Scotch-Yoke-Motor läßt außerdem reduzierte Torsionseigenschwingungen erwarten. Die gute Laufruhe kann durch mehrere Ursachen erklärt werden.

4.1 Perfekter Massenausgleich

Durch das vollständige Fehlen einer Bewegung der Pleuel senkrecht zur Bewegungsrichtung der Kolben entstehen keinerlei Massenkräfte oder -momente zweiter oder höherer Ordnung. Für den vollständigen Massenausgleich muß bei Motoren mit mehr als zwei Zylindern lediglich das durch den Abstand der Zylinderachsen hervorgerufene Giermoment um die Motorhochachse berücksichtigt werden. Durch die Verwendung einer einzigen Ausgleichswelle, die nur mit einfacher Motordrehzahl umläuft, werden alle freien Massenkräfte und -momente vollständig ausgeglichen. Konventionelle Motoren sind in Fällen, wo auf besondere Laufruhe Wert gelegt wird, mit Ausgleichswellen ausgestattet, die dem Ausgleich von Massenwirkungen zweiter Ordnung dienen. Dabei müssen zwei Wellen verwendet und mit der doppelten Motordrehzahl angetrieben werden. Dies schafft nicht nur konstruktive Probleme, sondern ist auch noch relativ kostspielig.

Die mechanischen Verluste einer langsam rotierenden Welle im Scotch-Yoke-Motor sind wesentlich niedriger als die Verluste von zwei Ausgleichswellen im konventionellen Motor, die mit Drehzahlen von 13 000/min oder mehr rotieren. Die sehr hohen Drehzahlen können außerdem Geräuschprobleme hervorrufen. Bei der horizontalen Zylinderanordnung der CMC-Scotch-Yoke-Motoren kann die Ausgleichswelle platzsparend unterhalb einer Zylinderbank montiert werden

und vergrößert dadurch nicht den im Automobil notwendigen Bauraum. Die Welle rotiert entgegen dem Drehsinn der Kurbelwelle und kann von der Außenseite der Steuerkette oder des Zahnriemens angetrieben werden.

4.2 Reduzierte Kolbengeräusche

Einen weiteren Beitrag zum günstigen Verhalten der Scotch-Yoke-Motoren in Bezug auf Lärmemission und Vibrationen leistet die Reduzierung des Kolbenkippens. Der konventionelle Kolben wird nur durch den Kolbenschaft geführt und ändert während der vier Takte eines Gaswechsel- und Verbrennungszyklusses, abhängig von Drehzahl und Belastung, zwischen zwei- und achtmal die Seite des Zylinders, an der er anliegt. Die Höhe des Kolbenaufschlagimpulses, der das erzeugte Geräusch beeinflusst, hängt von der Seitenkraft ab, die auf den Kolben wirkt. Der Scotch-Yoke-Mechanismus wird durch die beiden weit auseinander liegenden, fest miteinander verbundenen Kolben geführt. Der weite Abstand verhindert dabei das Kolbenkippen weitgehend. Wichtiger noch ist jedoch die Tatsache, daß die Kolbenseitenkraft, die auch für die mechanischen Verluste des Kolbens und den Kolben- und Zylinderverschleiß verantwortlich ist, beim Scotch-Yoke-Motor wesentlich geringer ist als beim konventionellen Kurbeltrieb, **Bild 5**. Besonders die Kraftspitze nahe des oberen Totpunktes, wo wegen der relativ langsamen Kolbenbewegung und der hohen Gastemperaturen die Kolbenschmierung problematisch ist, tritt beim Scotch-Yoke-Motor nur mit etwa der halben Amplitude auf. Die Seitenkraftspitze in der Nähe des unteren Totpunkts wird durch die Zündung des gegenüberliegenden Zylinders verursacht. Das an der Kurbelwelle abgegebene Drehmoment ist beim CMC-Scotch-Yoke-Motor, von Reibungseinflüssen abgesehen, gleich dem Reaktionsmoment, das durch die Seitenkräfte der gegenüberliegenden Kolben am Hebelarm ihres Abstandes voneinander hervorgerufen wird. Je größer der Abstand der gegenüberliegenden Kolben ist, desto kleiner wird die Kraft, die senkrecht auf die Zylinderoberfläche ausgeübt wird.

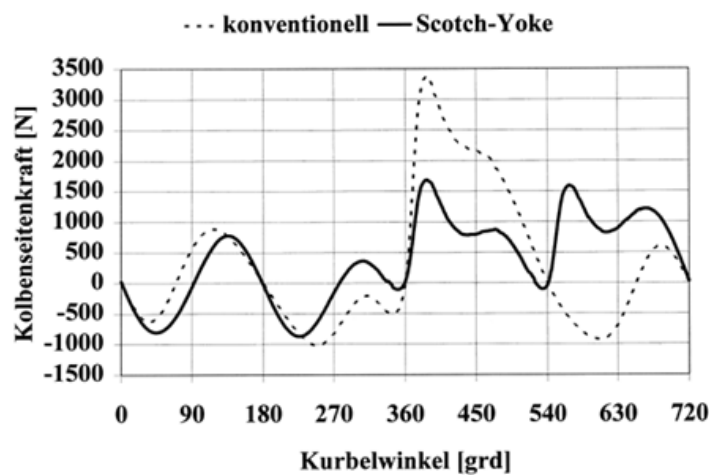


Bild 5: Korbenseitenkräfte des Scotch-Yoke- und des konventionellen Motors bei 4 000/min

Fig. 5: Piston sideforces of the Scotch Yoke and the conventional engine at 4 000 rpm

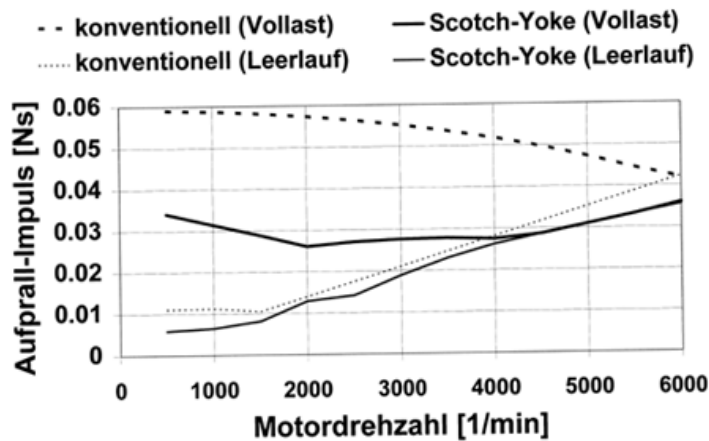


Bild 6: Maximaler Aufprallimpuls-Spitzenwert des Kolbens auf die Zylinderwand

Fig. 6: Maximum piston impact impulse onto the cylinderwall

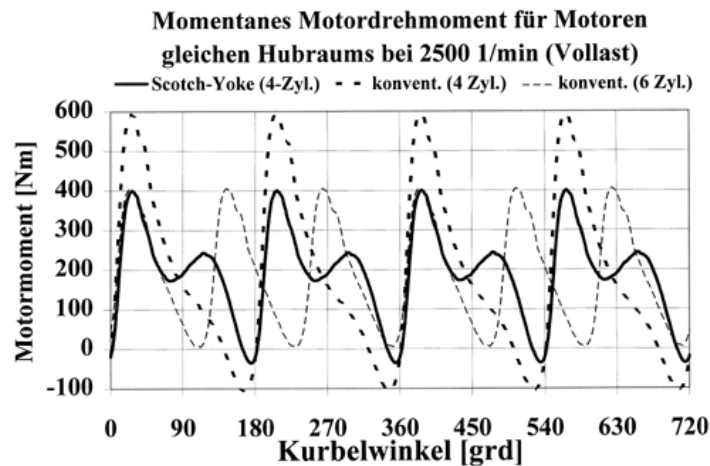


Bild 7: Reduzierung der Drehmomentschwankung durch Erhöhung der Zylinderzahl oder durch Verwendung des Scotch-Yoke-Kurbeltriebs

Fig. 7: Reduction of the peak to peak variation of the output torque by increasing the number of cylinders or by employing a Scotch Yoke crank mechanism

Beim konventionellen Motor entspricht das Moment in etwa der Kolbenseitenkraft multipliziert mit dem Abstand der Kraftwirkungslinie von der Kurbelwellenachse. Vor jedem Anlagewechsel wird der Kolben durch die herrschende Seitenkraft beschleunigt und trifft um so heftiger auf die Zylinderwand auf, je größer die beschleunigende Kraft und der Beschleunigungsweg ist. Unter der Annahme, daß das Kolbenspiel in beiden Motorbauarten gleich ist, ergibt sich bei niedriger Last ein geringer, bei Vollast aber ein beträchtlicher Vorteil für den Scotch-Yoke-Motor, **Bild 6**. Im am häufigsten benutzten Drehzahlbereich um 2 000/min ist der größte Vorteil zu erwarten.

4.3 Gleichförmigkeitsgrad des Drehmoments

Da Verbrennungsmotoren ihr Drehmoment intermittierend erzeugen, schwankt das momentan abgegebene Moment um ein Vielfaches des nach außen abgegebenen durchschnittlichen Motormoments. Der Gleichförmigkeitsgrad wird verbessert, wenn die Masse des Schwungrades erhöht wird. Dies verhindert aber gewollte schnelle Drehzahländerungen und erhöht das Motorgewicht. Die Drehmomentschwankungen werden durch die oszillierenden Massenträgheitswirkungen um die Kurbelwellenachse und durch die wechselnden Gasdrücke in den Zylindern beeinflusst und sind bei Motoren mit weniger Zylindern größer als bei höherer Zylinderzahl. In Scotch-Yoke-Motoren sind diese Drehmomentschwankungen in allen wichtigen Arbeitsbereichen wesentlich geringer als bei entsprechenden konventionellen Motoren. **Bild 7** zeigt das momentane Drehmoment eines Vierzylinder Scotch-Yoke-Motors bei Vollast im Vergleich mit dem momentanen Drehmoment eines konventionellen Vierzylinder-Boxermotors unter gleichen Bedingungen. Die Differenz zwischen den positiven und den negativen Drehmomentspitzen ist ein Maß für die Gleichförmigkeit der Drehmomentabgabe. Dieser Wert ist im gesamten Drehzahl/Drehmomentbereich für den Scotch-Yoke-Motor günstiger. Nur im Bereich sehr hoher Drehzahlen ist die Drehmomentschwankung beim Scotch-Yoke-Motor höher. Wegen der schnellen Aufeinanderfolge der Schwankungen machen sie sich hier nicht so störend bemerkbar wie bei sehr niedrigen Drehzahlen, wo sie neben den fühlbaren Vibrationen zusammen mit den Elastizitäten des Antriebsstranges Ruckeln verursachen können. Niedrige Schwingungsamplituden reduzieren auch das Entstehen schwer zu unterdrückender Resonanzschwingungen anderer Fahrzeugteile. Um die zyklischen Drehmomentschwankungen, die bei einem normalen Reihenmotor auftreten, zu reduzieren, könnte zum Beispiel von einem Vierzylinder Reihenmotor auf einen Sechszylinder V-Motor übergegangen werden, allerdings mit dem damit verbundenen Anstieg der Kosten und einem um etwa 20 % erhöhten Platzbedarf. Es könnte aber auch ein Vierzylinder-Scotch-Yoke-Motor verwendet werden, der gleichzeitig den notwendigen Platzbedarf um etwa ein Viertel senkt. Die berechneten Vollastwerte des momentanen Drehmoments eines entsprechenden konventionellen Sechszylindermotors sind ebenfalls in **Bild 7** gezeigt.

5 ZUSÄTZLICHE VORTEILE

Beträchtliche Vorteile auf einem Gebiet müssen bei der heutigen ausgereiften Motorentechnik gewöhnlich mit Nachteilen auf anderen Gebieten erkaufte werden. Beim CMC-Scotch-Yoke-Motor scheint dies nicht der Fall zu sein. Hinsichtlich aller untersuchten Parameter verhalten sich die Scotch-Yoke-Motoren gleich oder sogar besser als vergleichbare Motoren herkömmlicher Bauart.

5.1 Mechanischer Wirkungsgrad und spezifischer Verbrauch

Das lineare Gleitlager ist in der Anwendung im Verbrennungsmotor nicht sehr gebräuchlich und wird daher zu Unrecht leicht als ein Bauteil mit ungenügendem mechanischen Wirkungsgrad angesehen. Wenn jedoch die Ölversorgung sichergestellt ist, gibt es keinen Grund dafür, daß dieses Lager höhere Verluste verursacht als normale Pleuellager.

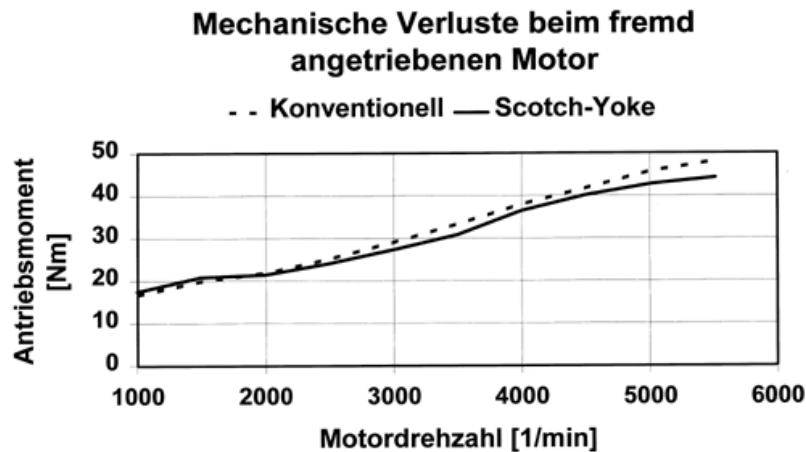


Bild 8: Reduktion der mechanischen Motorverluste beim Scotch-Yoke-Motor

Fig. 8: Reduction of mechanical engine losses for the Scotch Yoke engine

Tabelle 2: Spezifischer Kraftstoffverbrauch der 2,2 Liter-Otto-Motoren

Table 2: Specific fuel consumption of the 2.2 litre S.I. engines

Drehzahl 1/min	Mittlerer eff. Druck kPa	Scotch-Yoke g/kWh	Konvent. Motor g/kWh
1300	295	339	353
1500	262	356	363
1600	241	369	394
2200	405	298	316

Tabelle 3: Gemessene Teillastwerte für die NO_x-Emission (Ottomotor)

Table 3: Measured partload NO_x emissions (Spark Ignition engines)

Drehzahl 1/min	Mittlerer eff. Druck kPa	Scotch-Yoke NO _x ppm	Konvent. Motor NO _x ppm
1300	295	1570	2150
1500	262	1220	1850
1600	241	1212	1650
2200	405	2130	3230

Den mechanischen Verlusten in den zwei Linearlagern und der Antriebsleistung der nur mit Motordrehzahl umlaufenden Ausgleichswelle stehen im Vierzylindermotor die Einsparungen der Verluste in zwei Kurbelwellenlagern, zwei Pleuellagern, vier Kolbenbolzen und die reduzierten Reibungsverluste der Kolben gegenüber. Bei konventionellen Motoren mit zwei Ausgleichswellen, die mit doppelter Motordrehzahl angetrieben werden müssen, wird der Unterschied noch größer. Der Vergleich von experimentell gewonnenen Verlustwerten ist in **Bild 8** gezeigt.

5.2 Stickoxid-Emissionen

Für diese Messungen wurden die Motoren durch einen pendelnd gelagerten Elektromotor fremdangetrieben. Da dem mechanischen Wirkungsgrad des Scotch-Yoke-Motors besondere Bedeutung beigemessen werden muß, wurde er außerdem unter normal befeuerten Betrieb mit Hilfe des indizierten Zylinderdruckes und des abgegebenen Motormoments bestimmt, **Bild 9**. Der Wirkungsgradvorteil des Scotch-Yokes wird besonders bei hohen Motordrehzahlen sichtbar, während sich beide Motoren bei niedrigen Drehzahlen etwa gleich verhalten. Durch die geringeren Schwankungen des abgegebenen Drehmoments läßt sich beim Scotch-Yoke-Motor allerdings basierend auf Prüfstandserfahrungen eine wesentlich niedrigere Leerlaufdrehzahl realisieren. Dies läßt Verbesserungen im

Kraftstoffverbrauch erwarten und könnte besonders für den Kraftstoffverbrauch von Hybridfahrzeugen von Vorteile sein. **Tabelle 2** zeigt einen Vergleich der spezifischen Kraftstoffverbräuche unter verschiedenen Teillastbedingungen für beide Motorbauweisen. Die sinusförmige Kolbenbewegung von Scotch-Yoke-Motoren bewirkt, daß sich die Kolben länger als beim normalen Kurbeltrieb in der Nähe des oberen Totpunktes aufhalten. Dieser Unterschied beeinflusst die Verbrennung im Zylinder und ändert daher die Stickoxid-Emissionen in Diesel- und Ottomotoren. Bei Dieselmotoren wird wegen des hier niedrigeren Luftverhältnisses am meisten Stickoxid nahe der Vollast erzeugt, während im Ottomotor die Spitzenwerte bei mageren Gemischen im Teillastbetrieb auftreten.

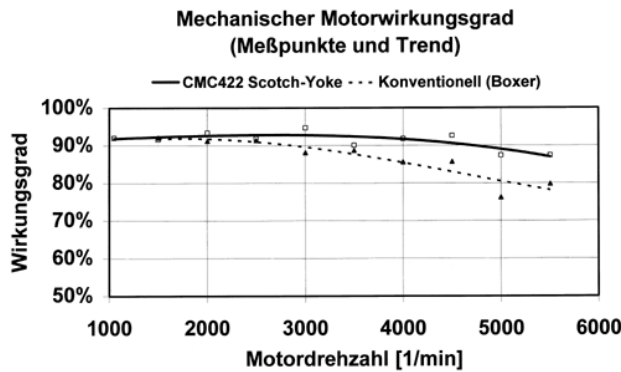


Bild 9: Aus indiziertem Druck und Motormoment gemessener mechanischer Motorwirkungsgrad
Fig. 9: Mechanical engine efficiency measured from indicated cylinder pressure and engine torque

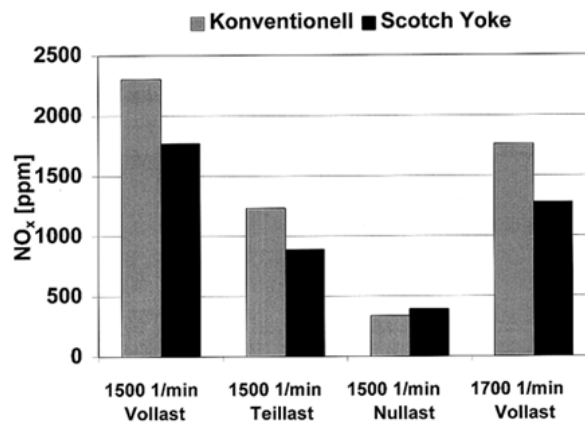


Bild 10: Berechnete NOx-Emissionswerte für Dieselmotoren mit direkter Einspritzung
Fig. 10: Calculated NOx-emissions for direct injection Diesel engines

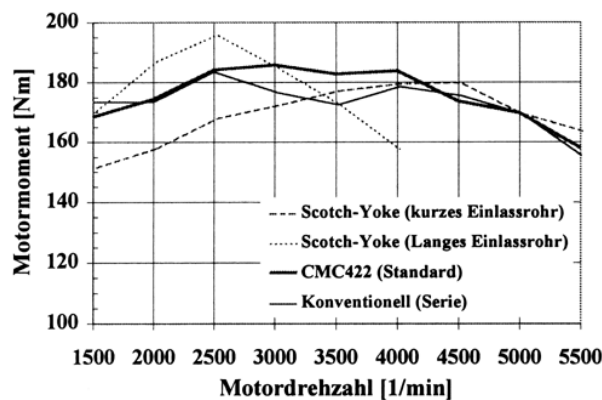


Bild 11: Vollastdrehmoment des CMC 422 Scotch-Yoke-Motors mit kurzem und langem Saugrohr im Vergleich mit dem konventionellen Motor
Fig. 11: WOT Torque of the CMC 422 Scotch Yoke engine with short and long manifold in comparison to the conventional engine

Tabelle 3 zeigt die Stickoxid-Meßergebnisse in einigen Teillastpunkten im Vergleich für beide Ottomotor-Bauarten. Trotz der großen Abhängigkeit des NO_x-Ausstoßes vom Luftverhältnis und der deshalb geringen Genauigkeit der Stickoxid-Messung zeigen die Werte einen eindeutigen Vorteil für den Scotch-Yoke-Motor. Für Dieselergebnisse stehen noch keine vergleichbaren Motoren für beide Bauarten zur Verfügung, aber die Vorhersagen der Verbrennungsberechnung zeigt klare Vorteile für die NO_x-Emission mit sinusförmiger Kolbenbewegung bei mittlerer und hoher Last, **Bild 10**.

5.3 Schaltbarer Einlaßkrümmer

Mehr und mehr Fahrzeugmotoren werden mit schaltbaren Einlaßkrümmern angeboten, um ein hohes Motormoment im unteren Drehzahlbereich mit gleichzeitig hohen Leistungen bei hoher Motordrehzahl zu verbinden. Dabei bereitet die Unterbringung der größeren Rohrlängen oft Schwierigkeiten in V- und Reihenmotoren. Die horizontal gegenüberliegende Anordnung der Zylinder im Scotch-Yoke-Motor erlaubt zum Beispiel im 2,2-l-Motor CMC 422 den Einsatz einer Rohrlänge von 950 mm zwischen Luftsammler und Einlaßventil ohne großen Anstieg der äußeren Motorabmessungen. **Bild 11** zeigt die Vollast-Drehmomentkurven für kurze und lange Saugrohre beim Scotch-Yoke-Motor und zum Vergleich die Drehmomente beider Motorbauarten mit starrem Saugrohr. Beide Motoren wurden für diesen Vergleich auf ein Luftverhältnis von $\lambda = 0,95$ eingestellt. Eine Optimierung der Ventilsteuerzeiten für die sinusförmige Kolbenbewegung könnte eine weitere Verbesserung des Drehmoments beim Scotch-Yoke-Motor ermöglichen.

6 ZUSAMMENFASSUNG

Die anfänglich vorhandenen Befürchtungen von zu erwartenden Funktions-, Dauerhaltbarkeits- und Wirkungsgradproblemen mit dem Kurbelschlaufenmechanismus konnten durch theoretische Berechnungen und praktische Prüfstandsversuche vollständig entkräftet werden. Der vorher hauptsächlich erwartete Vorteil des Scotch-Yoke-Motors wurde bestätigt. Zusätzlich wurden hervorragende Ergebnisse bezüglich der Laufruhe von Scotch-Yoke-Motoren nachgewiesen. Die allgemeine Annahme relativ schlechter mechanischer Wirkungsgrade wurde nicht bestätigt. Im Gegenteil, besonders bei hohen Drehzahlen wurden beim Scotch-Yoke-Motor bessere Wirkungsgrade als beim konventionellen Motor gemessen. Der CMC-Kurbelmechanismus ist für Otto- und Dieselmotoren im Zweitakt- und Viertaktverfahren geeignet. Jede gerade Anzahl von Zylindern kann verwendet werden. Bezüglich Massenausgleich und Zündabstand sind Vier-, Acht- und Zwölfzylindermotoren besonders vorteilhaft. Eine Analyse der Herstellungskosten ergab außerdem einen leichten Vorteil für den Scotch-Yoke-Motor im Vergleich mit dem konventionellen Boxermotor.

LITERATURHINWEISE

- [1] Rosenkranz, H.G.; Watson, H.C.: *The Scotch Yoke for Internal Combustion Engines - An Opportunity Revived by new Technology*. In: Journal of the JSAE, Vol.50. No.5, 1996
- [2] Rosenkranz, H.G.; Watson, H.C.: *The Collins Scotch Yoke Engine as a Compact Alternative - A Theoretical Comparison of Features of Scotch Yoke and Conventional Engines*. SAE Paper 950091, 1995
- [3] Rosenkranz, H.G.: *A better Crank Mechanism with reduced Environmental Impact. The Scotch Yoke engine combines high power density with improved fuel consumption and lower noise and exhaust emissions*. International Symposium on Energy, Environment and Economics, Melbourne 1995
- [4] Rosenkranz, H.G.; Watson, H.C.: *The Application of the Scotch Yoke Principle to Road Vehicle Engines. Influence on Design, Fuel Consumption and Emissions*. 14.VDI/VW Gemeinschaftstagung, Wolfsburg, 1994