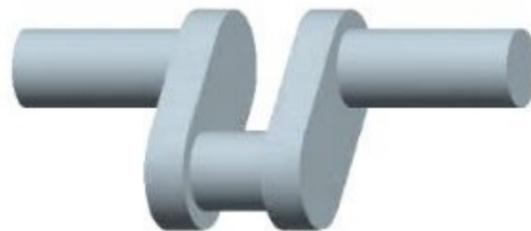


Massenausgleich und Laufruhe von Hubkolbenmotoren

(C) www.brucewilles.de

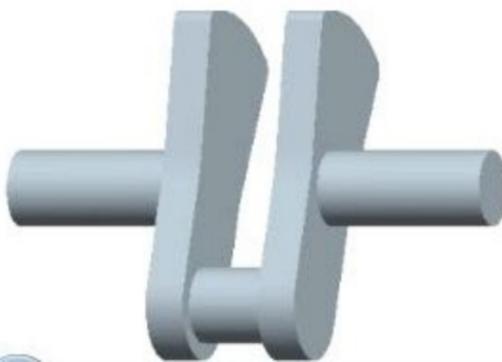
Woher kommen eigentlich Motorvibrationen? Man könnte glauben, die Vibrationen entstünden durch die explosionsartige Verbrennung des Gemischs im Brennraum. Diese Vermutung ist jedoch nicht haltbar, da bei der Verbrennung des Gemischs der Druck der Reaktionsgase gleichzeitig in alle Richtungen im Brennraum wirkt. Die wirkenden Kräfte heben sich somit nach außen hin vollständig auf!

Motorvibrationen entstehen stattdessen direkt durch die Drehung der Kurbelwelle.



Würde man diese drehende Kurbelwelle an ihren beiden Enden in den Händen halten, so könnte man schön die Kräfte spüren, die normalerweise das Kurbelgehäuse aufnehmen muss. Genau diese Kräfte sind es, die zur Vibration des Motors führen.

Mit einem einfachen Massenausgleich kann man diese **rotierende Massenkraft** vollständig kompensieren:



Würde man diese drehende Kurbelwelle wieder an ihren Enden in den Händen halten, wären die Vibrationen vollständig weg! (Man müsste nur noch eine statische Kraft aufbringen, um das Gewicht überhaupt zu halten.)

Nun ist leider an einer echten Kurbelwelle noch die Pleuelstange und der Kolben befestigt:



Die Bewegung der Pleuelstange ist durchaus komplex. Der Einfachheit halber teilt man die Pleuelstange daher in zwei fiktive Massen auf. Ein Teil wird zur „rotierenden Masse“ geschlagen, der andere Teil zur „oszillierenden Masse“. (Die oszillierende Masse ist die Masse die sich auf- und ab bewegt. Also der Kolben.)

- Der **rotierende Massenanteil der Pleuelstange** lässt sich leicht durch weiteres Erhöhen des rotierenden Ausgleichgewichts ausgleichen (so wie wir es oben schonmal gemacht haben).
- Die **oszillierende Masse** (also die Kolbenmasse plus die Hälfte der Pleuelstangenmasse) kann man nur **näherungsweise** ausgleichen. (Entweder man erhöht das Ausgleichgewicht so stark, dass zwar im Oberen- und Unteren Totpunkt die oszillierende Massenkraft vollständig kompensiert wird, dafür aber 90° vor und nach den Totpunkten starke horizontal wirkende Massenkräfte vorhanden sind, oder man erhöht das Ausgleichgewicht nicht und vermeidet dadurch die zuletzt genannten Kräfte zu Lasten einer geringeren Reduktion der oszillierenden Massenkraft.) *Die endgültige Dimensionierung des Ausgleichgewichts stellt ein Kompromiss dar, bei dem aber in jedem Fall freie Massenkräfte bestehen bleiben!*

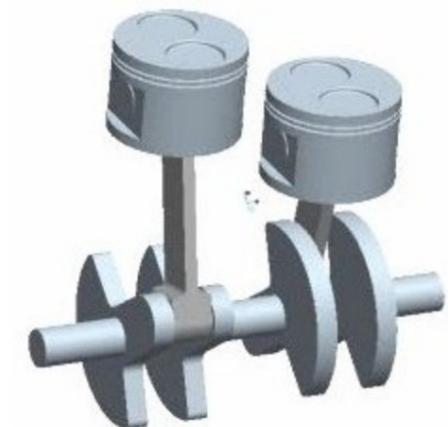
So könnte das Ausgleichgewicht eines 1-Zylindermotors beispielsweise dimensioniert werden:



Wir gesagt: Der hier gemachte Massenausgleich ist nur ein Kompromiss, der Motor wird also trotzdem vibrieren.

Was macht man nun? Zylinderzahl erhöhen.

Schon mit einem einfachen Reihen-2-Zylindermotor (2-Takt) lassen sich die so genannten „freien Massenkräfte erster Ordnung“ vermeiden:



Durch die gegenläufige Bewegung gleichen sich die freien Massenkräfte erster Ordnung wunderbar von selbst aus. Dafür neigt dieser Motor nun aber dazu, wegen der unsymmetrischen Kolbenbewegung um seinen Mittelpunkt hin und her zu kipeln. Es entstehen so genannte „freie Massen**momente** erster Ordnung“.

Um die freien Massenmomente zu kompensieren könnte man einfach einen Reihen-2-Zylinder 4-Takt Motor verwenden:



Dieser 2-Zylindermotor hat jetzt zwar keine freien Massen**momente** mehr, dafür aber wieder sehr starke freie Massen**kräfte** (nämlich genau doppelt so starke wie der 1-Zylindermotor). Mit dem Reihen-4-Zylinder 4-Takt kommt man aus dieser Zwickmühle heraus:



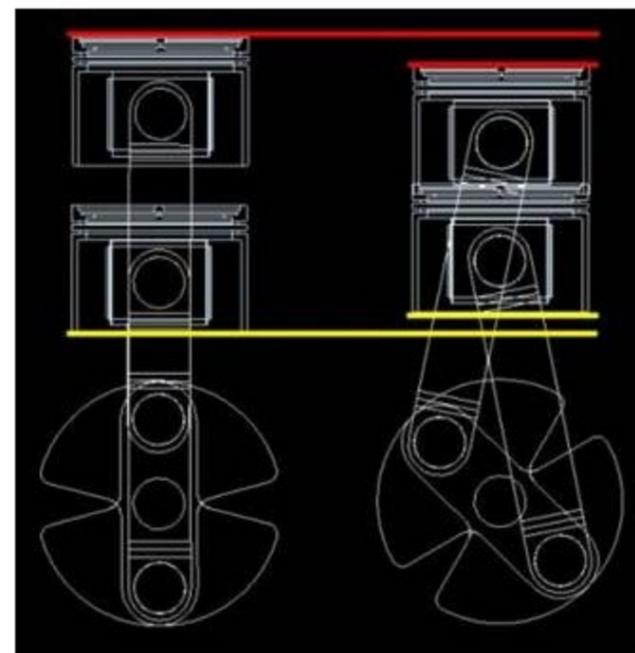
Der 4-Zylinder weißt weder freie Massenkräfte erster Ordnung noch freie Massenmomente erster Ordnung auf! Das ist der eigentliche Grund, warum 4-Zylinder Motoren so weit verbreitet sind!

Neben der ersten Ordnung gibt es nun aber noch die **"zweite Ordnung"**...

Hierzu vorweg eine höchst verblüffende Tatsache: **„Die sich nach oben bewegenden Kolben bewegen sich nicht mit der gleichen Geschwindigkeit wie die sich gleichzeitig nach unten bewegenden Kolben!“**

"Aber das kann doch gar nicht sein!?! Die Kolben sind doch ganz offensichtlich immer gleichzeitig am oberen und unteren Totpunkt!?!" Richtig, sind sie. Aber auf ihrem Weg von einem Totpunkt zum anderen ist zuerst der eine Kolben schneller, dann der andere. Im zeitlichen Mittel sind sie dann wiederum gleich schnell.

Betrachten wir zum Verständnis dessen den Querschnitt eines einfachen 2-Zylinder Motors:



Links steht die Kurbelwelle bei 0 Grad, rechts wurde die Kurbelwelle um 45 Grad gedreht. Die Strecke, die dabei der obere Kolben zurückgelegt hat (Abstand der roten Linien), ist gut erkennbar größer als die Strecke, die der untere Kolben zurückgelegt hat (Abstand der gelben Linien). Einzig logischer Schluss: Der obere Kolben MUSS schneller gewesen sein! Wer es nicht glaubt, zeichnet die Grafik selbst, am besten nicht nur bei 0° und 45°, sondern auch noch bei vielen weiteren Winkeln zwischen 0° und 180°. Wenn man das selbst gemacht hat, dann sieht man ein, dass die Bewegung der Kolben eben in Wirklichkeit nicht so symmetrisch ist, wie es auf den ersten Blick wirkt.

Lange Rede kurzer Sinn: Zwischen den sich auf- und abbewegenden Kolben bestehen kleine Geschwindigkeitsdifferenzen, die zu sogenannten "Massenkräften und -momenten zweiter Ordnung" führen.

Was kann man dagegen machen? Reihen-6-Zylinder.

gelben Linien). Einzig logischer Schluss: Der obere Kolben MUSS schneller gewesen sein! Wer es nicht glaubt, zeichnet die Grafik selbst, am besten nicht nur bei 0° und 45° , sondern auch noch bei vielen weiteren Winkeln zwischen 0° und 180° . Wenn man das selbst gemacht hat, dann sieht man ein, dass die Bewegung der Kolben eben in Wirklichkeit nicht so symmetrisch ist, wie es auf den ersten Blick wirkt.

Lange Rede kurzer Sinn: Zwischen den sich auf- und abbewegenden Kolben bestehen kleine Geschwindigkeitsdifferenzen, die zu sogenannten "Massenkräften und -momenten zweiter Ordnung" führen.

Was kann man dagegen machen? Reihen-6-Zylinder.



Beim Reihen-6-Zylinder kompensieren sich die einzelnen Kräfte und Momente erster wie auch **zweiter** Ordnung vollständig. Deshalb ist er in Sachen Laufruhe im Wesentlichen nicht zu überbieten.

V-Motoren bringen von ihrer Bauform her keinen Vorteil hinsichtlich der Laufruhe. Lediglich aufgrund ihrer üblicherweise höheren Zylinderzahl kann die Laufruhe noch leicht gesteigert werden, da die Drehmomentabgabe gleichmäßiger wird. (Reihenmotoren noch länger als 6 Zylinder zu bauen wird langsam schwierig, da sich die Pleuellager zu sehr verdreht.)

Eine interessante Sonderrolle nimmt der Boxermotor ein:



Wenn man einmal vernachlässigt, dass die gegenüberliegenden Kolben leicht versetzt sind, dann hat der Boxermotor keinerlei freie Kräfte und Momente, unabhängig von der Zylinderzahl (diese muss natürlich gerade sein). Also durchaus eine feine Sache!

Die folgende Tabelle zeigt die Berechnungsergebnisse für die wichtigsten Motoren. Der angegebene Faktor beschreibt jeweils die Intensität der Kraft- bzw. Momentenkomponente, wobei die zweite Ordnung generell in geringerer Intensität als die erste Ordnung zu spüren ist. (Beispiel: Ein Faktor „2“ bei der zweiten Ordnung ist deutlich weniger „schlimm“ als ein Faktor „2“ bei der ersten Ordnung. Überall Faktor „0“ ist selbstverständlich am Besten.)

	Freie Massenkräfte erster	Freie Massenmomente erster	Freie Massenkräfte zweiter	Freie Massenmomente zweiter
--	---------------------------	----------------------------	----------------------------	-----------------------------

Die folgende Tabelle zeigt die Berechnungsergebnisse für die wichtigsten Motoren. Der angegebene Faktor beschreibt jeweils die Intensität der Kraft- bzw. Momentenkomponente, wobei die zweite Ordnung generell in geringerer Intensität als die erste Ordnung zu spüren ist. (Beispiel: Ein Faktor „2“ bei der zweiten Ordnung ist deutlich weniger „schlimm“ als ein Faktor „2“ bei der ersten Ordnung. Überall Faktor „0“ ist selbstverständlich am Besten.)

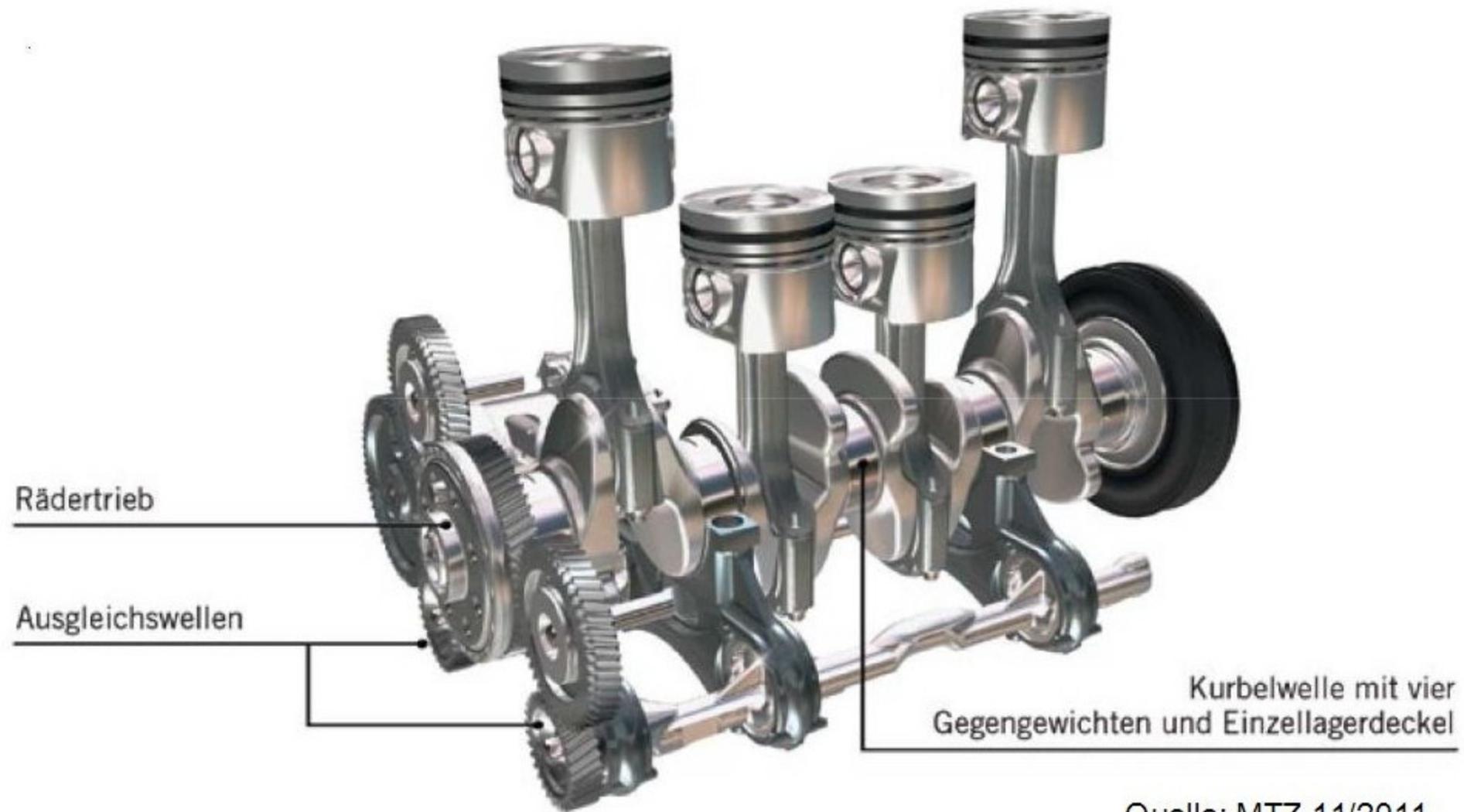
	Freie Massenkräfte erster Ordnung	Freie Massenmomente erster Ordnung	Freie Massenkräfte zweiter Ordnung	Freie Massenmomente zweiter Ordnung
2-Takter				
1-Zylinder	1	0	1	0
Reihen-2-Zylinder	0	1	2	0
Boxer	Wie 4-Takt Boxer (siehe unten)			
4-Takter				
1-Zylinder	1	0	1	0
Reihen-2-Zylinder	2	0	2	0
Reihen-3-Zylinder	0	1,7	0	1,7
Reihen-4-Zylinder	0	0	4	0
Reihen-5-Zylinder	0	0,5	0	5
Reihen-6-Zylinder	0	0	0	0
V6 (Bankwinkel 90°)	0	1,7	0	2,4
V8 (Bankwinkel 90°)	0	0	0	0
V12 (Bankwinkel 60°)	0	0	0	0
2-Zylinder-Boxer	0	~0	0	~0
4-Zylinder-Boxer	0	0	0	~0
6-Zylinder-Boxer	0	0	0	0

So. Und wem meine Erklärungen bis hierher gefallen haben, aber gerne mehr von der Kfz-Technik verstehen will, für den kommt im Prinzip nur ein einziges Buch in Frage:



Absoluter Bestseller bei Amazon, und das nicht ohne Grund: Das Buch ist gespickt mit herrlichen Abbildungen, Darstellungen und Diagrammen, die von der Qualität her im Internet nirgends zu finden sind! Es ist einfach nur ein Hochgenuss, in dem Buch zu lesen. Vor allem kann man sich auch darauf verlassen, dass alles was in dem Buch steht, wirklich sachlich RICHTIG ist. Und diese beiden "Zutaten" langen, dass das Buch zum Standardwerk eines jeden Kfz-Schraubers, Kfz-Mechatronikers und Studenten auf dem Gebiet geworden ist. [Hier der Amazon Link](#) zur aktuellen Auflage, viel Spaß damit.

Kurbeltrieb mit Ausgleichswellen zur Kompensation der Massenkräfte 2. Ordnung (Mercedes B-Klasse)



Quelle: MTZ 11/2011

Noch eine Erklärung

Die Massenkraft 1. Ordnung ändert ihre Größe mit Kurbelwellenfrequenz - daher 1.Ordnung (und ändert während einer Umdrehung also zweimal die Richtung). weil wie schon beschrieben wie eine Sinuskurve

Die Massenkraft zweiter Ordnung ändert mit doppelter Kurbelwellenfrequenz ihre Größe und während einer Umdrehung viermal die Richtung.

Diese Massenkräfte und die von ihnen hervorgerufenen Massenmomente wirken sich nach außen als freie Kräfte und Momente aus, die das Kurbelgehäuse in waagerechter und senkrechter Richtung hin und her zu bewegen versuchen; außerdem führen sie zu Kippbewegungen um die Motorachsen.

Diese freien Kräfte und Momente können mehr oder weniger - mit entsprechendem Aufwand sogar vollständig - durch Gegenmassen (Gegengewichte) oder/und durch entsprechende Zahl und Anordnung an Kröpfungen ausgeglichen werden, sodass der Motor nach außen hin in Ruhe verharrt.