

Der Klang alter Zweitakt-Motorräder – Teil 1

Udo Wagner^a, Matthias Domke^a, Peter Holstein^b, Jens Kleemann^b, Jörg Neugärtner^c,

^a *Microtech Gefell GmbH; Microtech Gefell GmbH, Georg-Neumann-Platz, 07926 Gefell, m.domke@microtechgefell.de*

^b *Steinbeis-Transfzentrum Technische Akustik und angewandte Numerik, Margarethenweg 9a, 04425 Taucha, peter.holstein@stw.de*

^c *Redline Consulting und Ingenieurbüro, REDLINE Ingenieurbüro, Karl-Stielr-Str. 60, 93051 Regensburg, info-redline@online.de*

1. Abstrakt

Die DAGA wird 50 Jahre alt. Wir wollen altersmäßig nicht nachstehen und etwas noch älteres zum Klingen bringen. Die Motorräder, die uns akustisch interessiert haben und deren Klang unverwechselbar ist, sind zum Teil älter als die Autoren selbst. Der Beitrag ist nicht rein wissenschaftlich ausgelegt sondern dient auch dazu, den Klang alter Technik geeignet zu beschreiben und zu "konservieren". Da die Messungen im Standbetrieb durchgeführt wurden, haben wir uns auf Klang- bzw. tonale Eigenschaften an den Auspuffanlagen von 2-Takt-Oldtimern konzentriert.

2. Einleitung

Wenn technische Systeme aus dem Alltag mit dem Verschwinden und durch neue Generationen ersetzt oder nicht mehr gebraucht werden, geht oft auch ihr Klangbild verloren. Auch in der Natur ist es oft so – und das ist leider ein sehr bedrohliche Entwicklung – dass mit dem Verschwinden von Tierarten auch ihre Lautäußerungen verschwinden. Man hat dies erkannt und archiviert auch Tierstimmen. Vielleicht ist es mit dem Klang der historischen Motorräder ähnlich. Ein wenig wollen wir gegensteuern, ausgewählte Beispiele zusammenstellen und Besonderheiten beschreiben. Ein wissenschaftliches Ziel steht noch nicht dahinter – eher die Begeisterung für die Kombination historischer Technik und Akustik. Die Ergebnisse sollen auch für die Ausbildung genutzt werden, da sich an den älteren Modellen viele Problemstellungen der technischen Akustik didaktisch oft interessant demonstrieren lassen.

Die Mechanismen, die die Akustik von Motorrädern bestimmen sind ebenso komplex wie von Automobilen, für die es naturgemäß natürlich viel mehr Untersuchungen gibt. Die Gründe sind offensichtlich. So ist es nicht weiter erstaunlich, dass wissenschaftliche und ingenieurtechnische Untersuchungen nur in relativ geringer Zahl (verglichen mit denen im Bereich Automotive) gibt [1]. Dies betrifft Windkanalexperimente ebenso wie Vorbeifahrten oder auch das „Tracking“ von Fahr- und Motorgeräuschen,

In Abbildung 1 ist ein Zeitausschnitt (Spektrogramm) eines vorbeifahrenden Motorrades dargestellt. Es ist offensichtlich, dass die Wirkungen des Motors und der Abgasanlage im Spektrum dominieren (Umdrehungszahl bzw. Motordrehzahl, Oberwellen - Ordnungen). Diese bestimmen letztendlich auch den „akustischen Fingerprint“. Der Klangeindruck insbesondere älterer Motorräder ist dabei

so spezifisch, dass der kundige Motorradliebhaber „seinen“ Typ – und manchmal sogar seine individuelle Maschine – heraushören kann. Es ist offensichtlich, dass sich Motorräder in Klang- und Geräuschverhalten auf der Straße deutlich von anderen Fahrzeugen unterscheiden. Die Schönheit dieses Klangs wird man in Zukunft noch mehr vermissen ~~geraten~~. Vielleicht wird er ganz verschwinden, wenn zunehmend Elektromotorräder durch die Straßen schnurren. In Städten, wo diese schon in größerer Zahl im Verkehr sind, wirkt sich das fehlende Motorgeräusch auch auf die Sicherheit aus, da die gewohnten Geräusche von Motorrädern dies bisher eindeutig als fahrende bzw. sich bewegende Verkehrsteilnehmer identifizieren.

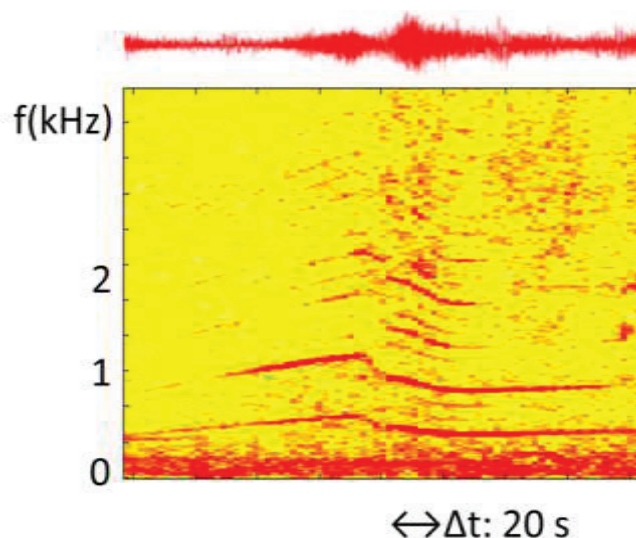


Abbildung 1: Typisches Zeitfrequenz-Verhalten eines Motorrades (hier 4-Takter) in einer Beschleunigungsphase. Der Beschleunigungsvorgang und Wechsel in einen höheren Gang ist deutlich zu sehen.

Die Mechanismen umfassen vor allem aerodynamische Quellen und Motorgeräusche. Wir wollen uns (auch aufgrund des Aufwandes und der Mittel die wir einsetzen können) auf Messungen im Stand und langsame Vorbeifahrten beschränken.

Es gibt eine Vielzahl von Motorradtypen, Funktions- und Konstruktionsprinzipien. Wir haben uns aus verschiedenen Gründen auf „alte“ Zweitakt-Motorräder (z.T. ca. 50 ... 60 Jahre alt) beschränkt. Die Gründe liegen vor allem darin, dass die „klangliche Jugend“ der Autoren hauptsächlich von den Fahrzeugen von MZ, Simpson und Jawa geprägt waren.

Hier gab es eine überraschende Vielzahl von Fahrzeugtypen. Zu bestimmten Zeiten haben diese Fahrzeuge auch den Stand der Technologie in der Welt mitbestimmt und waren Teil des technologischen Wettstreits zwischen Ost und West [2].

Deren typischer Zweitaktklang ist weitgehend aus dem Straßenbild verschwunden. Ein wenig Wehmut und Nostalgie sei den Autoren an dieser Stelle anlässlich des 50. Jahrestages der DEGA erlaubt.

3. Motivation

Als Motivation sollen zunächst einige Photos aus dem Umfeld des Autorenteam dienen. Solche Maschinen haben uns auf die Idee zum Artikel gebracht. Die Bedeutung des Zusammenhangs zur Akustik ist auch daran ersichtlich, dass die der Restaurierungserfolg in der Regel erst nach einer „positiv empfundenen“ Klangprobe bestätigt wird.

Zweitakter mögen mechanisch einfacher als 4-Takter aufgebaut sein, die Arbeitsweise kann aber durchaus „komplex und verworren“ sein. Die Akustik wird im Wesentlichen von den Arbeitstakten *Einlass, Verdichtung, Verbrennung, Auslass* [2] bestimmt:

Da es nur 2 Takte gibt, überlappen sich — im Gegensatz zum Viertakter - dies angrenzenden Vorgänge. Resonanzen, Schwingungen und Druckwellen sorgen für die Krafeintragung damit die Erzeugung der akustischen wirksamen Transfervorgänge. Die Strömungsverhältnisse sind komplex.



Abbildung 2: Eine RT 125/3 im Aufbau (oben) und

eine komplett restauriertes Motorrad (Mitte), unten: Rixe (Zweizylinder)

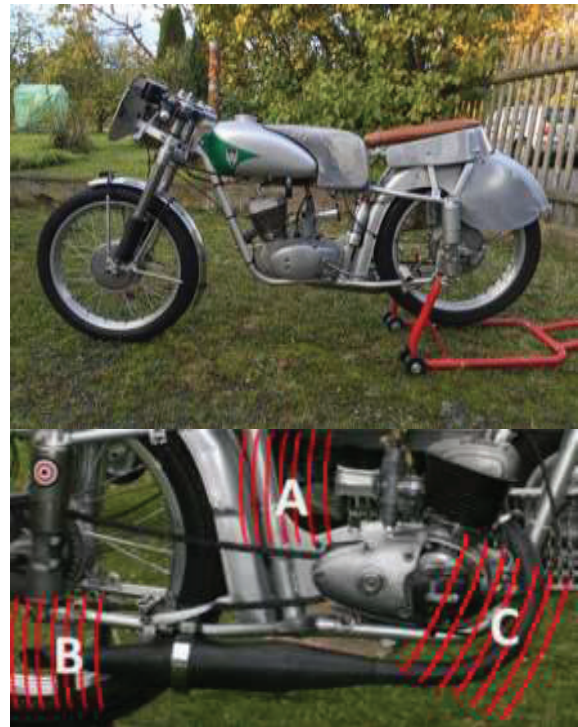


Abbildung 3: Eine RT-Rennsportversion [4], A: Lärmabstrahlung Ansaugöffnung (z. B. 30 %), B: Lärmabstrahlung Auspufföffnung (z. B. 65 %), C: Abstrahlung mechanischer Geräusche (z.B. 5 %)

Das Zweitakt-Gemisch wird meist ins Kurbelgehäuse gesaugt. Von dort gelangt es verwirbelt nach oben. Über geeignet dimensionierte Überströmkanäle wird der Brennraum mit dem Brennstoffgemisch versorgt. Dort erfolgt die Verbrennung. Über den Auslasskanal strömt das verbrannte Gas heraus. Die Schallwellen resonieren im Auspuffsystem. Die akustischen Wellen stehen beim Zweitakter direkt mit der Leistung in Zusammenhang. Kaaden in [2] versteht den Zweitakter als Resonanzeinrichtung. Die 2-Taktmotoren sind (einfacher in der Konstruktion. Allerdings wirken sich Änderungen und Optimierungsversuche sehr stark auf Leistung und Akustik aus.

4. Zweitaktmotoren

4.1 Spezifische Eigenschaften

Der Zweitaktmotor weist eine hohe Leistungsdichte, d.h. geringe Motormasse bei hoher maximaler Leistungsabgabe, auf. Über Jahrzehnte hinweg waren leistungsfähige Zweitaktmotoren in Flugzeugen, PKW, Boote, Jetski, Arbeitsgeräten und vor allem bei motorisierten Zweirädern in Ost und Westdeutschland im Einsatz. Die aufkommende Kritik – meist die Emissionen, Anfang der sechziger Jahre in Westdeutschland, an den oft nach dem Prinzip der Gemischschmierung ausgelegten Motoren, führte zur Einstellung der Produktion in den Siebzigern. Die bis dahin gebauten Motorradmotoren waren allerdings noch im Renneinsatz und bisweilen sehr erfolgreich. Z.B. wurden

nach 1973 in der 500ccm Klassen fast alle Motor GP Siege mit Zweitaktmotoren errungen. Meist sehr aufwendige Motoren mit Nockenwellensteuerung überzeugten bis in die 2000er Jahre mit hohen spezifischen Leistungen (z.T. bis 80PS, was 168 PS/l entspricht) und spontaner Leistungsentfaltung. Heute gibt es vereinzelt Anwendungen bei Rennmotoren für Hochseerennboote oder Flugzeuge.

Die bis 1990 in Ostdeutschland und Osteuropa beliebten PKW- und Motorrad Zweitaktmotoren konnten die zur Zulassung neu geltenden Emissionsgrenzwerte nicht erfüllen. Somit verschwanden sehr schnell alle bis dahin in großen Stückzahl gebauten PKW- und Zweirad Zweitaktmotorisierungen aus dem Angebot.

Heute kommen Motoren nach dem Zweitaktprinzip fast ausschließlich im Groß-Dieselmotorenbau, für mit Schweröl betriebene Containerschiffe z.B. mit BRZ = 170.794 BRZ und mit Antriebsleistungen von $P_{Nenn} > 5MW$ bei $n_{Motor} = 70-98$ 1/min. Außerdem sind bei kleinen Handarbeitsgeräten noch Motoren nach dem Zweitaktprinzip erhältlich. Neue weltweit anzutreffende Regularien zwingen hier zur aufwendigeren Lösungen oder zum Umstieg auf Motoren nach dem Viertakt-Prinzip.

Der einfache Aufbau der meisten Zweitaktmotoren täuscht über die aus ingenieurtechnischer Sicht anspruchsvollen Details bei der Motorausführung. Der Ladungswechsel mit jeder Motorumdrehung im unteren Totpunkt hat einen niedrigen Spülwirkungsgrad und damit verbunden thermodynamische Eigenheiten. Die teils hohen Restgasanteile behindern die Entflammung des Gemischs und führen in der Vollast zu niedrigeren Verbrennungsdrücken. Vgl. hierzu Meinig et. al [3]

Die niedrigen Verbrennungsdrücke sind aus akustischer Sicht vorteilhaft und werden durch die höhere Arbeitszahl kompensiert. Dabei ist im Gegensatz zum Viertaktmotor bei gleicher Drehzahl, mit jeder Umdrehung ein positiver Beitrag bzgl. des Drehmoments je Zylinder gegeben. Die nachfolgende Formel zeigt den Zusammenhang (1) für vom Motor abgegebene Leistung P:

$$P = V_H * n * i * p_{mi} ; (1)$$

mit $i = 1/2$ für Viertakter, $i = 1$ für Zweitakter

Dabei ist ersichtlich, dass bei gleichen Hubvolumen (V_H) und Drehzahl (n) trotz kleinerem mittlerem Zylinderdrucks (p_{mi}) die gleiche oder ggfs. auch größere Motorleistung möglich ist.

Geringer Drehungleichförmigkeiten begünstigt eine niedrige Leerlaufdrehzahl, aber bei hohen Drehzahlen werden durch sinkenden Spülwirkungsgrad aufwendige Spülverfahren benötigt. Um das notwendige Spüldruckgefälle zu erzeugen kommen oft Spülluftpumpen zum Einsatz. Auch werden bei Meinig et. al [3]. Konstruktionen aufgeführt, die einen zusätzlichen Zylinder oder das Kurbelgehäuse als Spülluftpumpe benutzen. Die dabei entstehenden Resonanzkammern erzeugen ein positives Spüldruckgefälle das zur Optimierung der Ausspülung des Brennraums und Erhöhung des Frischluftanteils verwendet wird.

4.2 Akustisches System – Zweitakter

Im Wesentlichen sind bei Motoren generell die folgenden Schallquellen zu benennen.

An erster Stelle sind die Verbrennung und der Ladungswechsel d.h. Druckgradienten beim Ansaugen- und Ausschieben, Ursache für Schallemissionen. Wie bereits ausgeführt kann von einer niedrigeren Schallanregung aus der Verbrennung, aufgrund der niedrigeren zu erwartenden Verbrennungsspritzendrücke und Druckgradienten als beim Viertaktmotor, ausgegangen werden. Dabei ist zu beachten, dass das Ansaugen und Ausstoßen mit der doppelten Frequenz im Vergleich zum Viertaktmotor erfolgt. Die Verschiebung der Schallemissionen hin zu hohen Frequenzen bei gleicher Drehzahl ist dabei nicht von Bedeutung. Vielmehr die höheren Differenzdrücke z.B. beim Auslass öffnen. Die kurzen Steuerzeiten d.h. wenigen Grad Kurbelwellenwinkel, die für den Ladungswechsel zur Verfügung stehen, machen ein öffnen des Auslass noch vor Ende der thermodynamisch optimalen vollständigen Expansion notwendig. Die Ausführung des Auspuffrohrs als Resonanztopf soll dabei das Ausschieben des Restgases optimieren. Dabei ist die Schallemission infolge der großen Auspuff-Oberfläche und meist dünnen verwendeten Bleche sehr dominant. Dabei ist der freie Mündungsquerschnitt bzw. Querschnittsfläche (S) und Zylinderanzahl entscheidend für die messbaren Schallpegel, die sich wie folgt abschätzen lassen (vgl. Zus. (2)).

$$L_{Auspuff} = 135 + 10 * \log \frac{n * z * i}{60} + 20 * \log S ; (2)$$

Bauartbedingt sind Laufgeräusche von Nockenwellen und Ketten zum Antrieb der Nockenwellen eher untypisch für ausgeführte Zweitaktmotoren. Bei Verwendung einer Spülluftpumpe, Kühl- oder Spülgebläses ergibt sich eine Schallanregung die zu einer nicht unerheblichen hochfrequenten Schallabstrahlung führt. Die Frequenzen solchen Gebläse lassen sich wie folgt berechnen

$$f_{Gebläse} = \frac{n * k}{60}$$

k- ist dabei die Anzahl der Gebläseschaukeln. Ebenfalls ist durch meist fehlende Kühlmittel- oder Ölpumpen mit Anregungen und Schallausstrahlungen bei hohen Motorordnungen infolge der meist mit Gemisch geschmierten und luftgekühlten Motoren selten zurechnen.

Bei der Nutzung von Resonanzsystemen und Klappen kommt es durch hohe Druckgradienten und damit schnellen Überströmen von Gemisch oder Abgas ebenfalls zu hochfrequenten Schallemissionen. Die Verwendung von Lüftern zur Versorgung der meist luftgekühlten Motoren wird aber meist als dominant wahrgenommen.

Der unverwechselbare Klang historischer Zweitaktmotoren ist außerdem durch das Motorprinzip bedingtes schnelles Hochdrehen verbunden. Durch den kurzen Zündabstand, vergleichsweise nur kleine Massen des Laufzeugs (geringe Massen von Kolben und Pleuel) und geringe notwendige Schwungmassen, die oft als Schwunglichtmaschine ausgeführt werden, verbunden. Die mit der

Drehzahländerung verbundene Schallpegeländerung lässt sich nach im Zusammenhang (3) dargestelltem Verhältnis der Ausgangs- (n_1) und Enddrehzahl (n_2) abschätzen. Die Ordnung ist dabei mit Motordrehzahl verbunden

$$\Delta L = 10 * \log \left[\left(\frac{n_1}{n_2} \right)^3 \right]; (3)$$

Leistungssteigerung bei Zweitaktmotoren ist durch Drehzahlanhebung unter Optimierung der Spülverluste leicht möglich. Im Gegensatz zu Viertaktmotoren, wo lange Zeit die hohen Massenkräfte und Belastungen (Beschleunigungen und Pressung) von Bauteilen im Ventiltrieb höchste Drehzahlen verhinderten. Erst mit der Einführung leistungsfähiger Werkstoffe und geeigneter Berechnungsverfahren zur Dynamik der Maschinenelemente wurden die von Zweitaktmotoren gesetzten Drehzahlgrenzen von ca. $n < 7000$ U/min überschritten. Typische Zweitaktmotoren z.B. für Motorräder erreichten ihre Nennleistung p_{Nenn} (MZ150 MJ1985-91) = 9 kW bei $n_{Nenn} = 6000$ 1/min. Motoren für Handarbeitsgeräte z.B. der Firma Stihl MS 500i $p_{Nenn} = 5$ kW bei $n_{Nenn} = 9000$ 1/min. Die damit verbundenen Schalldruckpegel liegen naturgemäß im Bereich von $L = 100$ dB(A) und darüber.

4. Experimente

Leider war die Vorbereitungsphase für den Artikel natürlich von den Ereignissen überlagert, die vor der DAGA lagen und leider zu Absage führen mussten. Die geplanten gemeinsamen Messungen und kleineren Testfahrten konnten daher nicht durchgeführt werden. Wir wollten aber auf unseren Beitrag im Jubiläumsband ganz verzichten und haben deshalb in unsere Archive gegriffen.

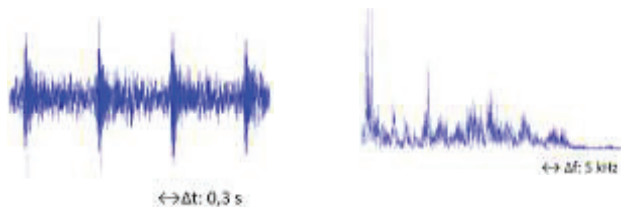


Abbildung 4: RT 125/3 Standgas – Zeitsignal und Spektrum (Ausschnitte), Standardgeräuschemessung nach DIN

Von Interesse bei den Messungen ist technisch bedingte Zeit- und Frequenzverhalten der unterschiedlichen Konstruktionen.

4. Zusammenfassung und Ausblick

Die Konservierung des Klages und der akustischen Eigenschaften von Motoren nach dem Zweitaktprinzip ist Passion und Chance für eine Fortführung dieses Motorprinzips in der Massenmotorisierung. So bietet der Zweitaktmotor auch zukünftig großes Potential für die Anwendung in Automobilen. Neueste Entwicklungen der Firma Stihl bei leistungsstarken und gewichtsoptimierten Arbeitsgeräten weisen dabei den Weg. Wie bei Dobler et. al [2] nachzulesen ist, können durch elektronische Einspritzung und Fremdschmierung die in der Vergangenheit kritisierten Emissionen auf ein Minimum reduziert und durch moderne Aufladeverfahren ergänzt, sehr leistungsfähige Motoren

gebaut werden. So ist die enorme Leistungsfähigkeit des Zweitaktprinzips schon heute bei ausgeführten Motoren für Rennboote u.a. bei Bamsey et. al [5] nachzulesen. Diese zeichnen sich durch ein geringes Leistungsgewicht bzw. Masse des Motors und einen einfachen Aufbau d.h. geringe Anzahl von Bauteilen aus. Insbesondere die Motormasse ist das entscheidende Kriterium für die erfolgreiche Umsetzung elektrifizierter Antriebsstränge mit großer Reichweite. So ist abzusehen, dass elektrifizierte Antriebsstränge, die als serielle Hybride oder als E-Antrieb mit verbrennungsmotorischen Reichweitenverlängerer (Range-Extender) das Potential zur Realisierung für die Massenmotorisierung bieten. In Verbindung mit nachhaltig erzeugten und sehr sauber verbrennenden synthetischen bzw. karbonisierten Kraftstoffen, können mit neuartigen Zweitaktmotoren leichte Fahrzeuge mit hohen Nutzlastfaktoren und Fahrkomfort realisiert werden. Allerdings geht das Autorenteam davon aus, dass die charakteristischen Eigenschaften des Zweitaktprinzips, d.h. die Kopplung von effektiver abgegebener Leistung und akustischen Emissionen bzw. zu erwartenden Schallpegeln erfolgreich gelöst werden können. Die Optimierung der Schallemissionen bei Ladungswechsel und besonders der Auspuffschallemissionen stellen hohe Anforderungen an Akustiker.

Die experimentellen Arbeiten werden in einem weiterführenden Teil 2 beschrieben.

Wir werden die angefangenen und geplanten Messungen, Soundsammlungen und Bewertungen fortsetzen und (so ist es geplant) zur nächsten DAGA zu präsentieren

Literatur

Ggf. Quellenformatierung anpassen

Pat

- [1] Kennedy, J.; Holt, N., The experimental measurement of motorcycle noise, 61th Meeting, Acoustical Society of America, 23 - 27 May 2011, The Journal of the Acoustical Society of America · June 2011
- [2] Oxley, M, Gestohlene Geschwindigkeit, NotSchriften Verlag, 2017; Radebeul, ISBN 978-1-84425-68901,
- [3] Meinig et. al, „Standortbestimmung Zweitaktmotoren“ – Reihe in MTZ Ausgabe 7/8-11, Springer 2001, Wiesbaden
- [4] Udo Wagner, privates Archiv
- [5] Bamsay, I.,