

## **Seminar „Hardware und Algorithmen in der KFZ- Elektronik“**

Vortragender: Janine Buchwald

Vortragsdatum: 16.07.2002

Betreuer: Dipl.-Ing. Mark Urlaub

**Thema: FEM II: Klopfen und Brennraumresonanzen**

Inhalt:

1. Was ist Klopfen?
2. Die klopfende Verbrennung im Detail
  - 2.1 Nachteile der klopfenden Verbrennung
  - 2.2 Regelung der klopfenden Verbrennung
3. Zeit-Frequenz-Darstellung von Brennraumresonanzen
4. FEM-Modell zur Simulation von Brennraumresonanzen
5. Vergleich von Ergebnissen aus FEM-Analyse und Messung
6. Fazit

Literatur:

- S.Carstens-Behrens, M.Urlaub, J.F.Böhme, J.Förster, F.Raichle, „FEM-Approximation of Internal Combustion Chambers for Knock Investigations“ 2002-01-02327
- S.Carstens-Behrens, „Untersuchungen klopfender Verbrennungen im Ottomotor mit Druck, Körperschall und Ionenstrom“, Bochumer Universitätsverlag, Bochum 2002

## **Einleitung:**

Diese schriftliche Ausarbeitung des Seminarvortrages „FEM II: Klopfen und Brennraumresonanzen“ befasst sich mit der Anwendung der **Finiten Elemente Methode (FEM)** im Bereich der Klopfdetektion bei der motorischen Verbrennung. Eine solche Verbrennungsanalyse wird im weiteren dazu verwendet, geeignete Sensorpositionen im Motorraum zu finden um frühzeitig Klopfen zu erkennen und weitestgehend zu vermeiden.

## **1. Was ist Klopfen?**

Die motorische Verbrennung lässt sich in zwei verschiedene Arten gliedern. Bei der *normalen* Verbrennung im Ottomotor wird das Kraftstoff-/Luftgemisch im Zylinder durch den Kolben verdichtet und dann durch einen Funken, ausgelöst durch die Zündkerze, entzündet. Die Expansion des verbrannten Gases treibt den Kolben im Zylinder in seine Ausgangsposition zurück und es wird an der Welle mechanische Arbeit verrichtet.

Die Güte der Verbrennung wird bestimmt durch das Mischungsverhältnis des Kraftstoff-/Luftgemisches und durch den Zündzeitpunkt des Gases. Die Kraftstoffe für Ottomotoren bestehen üblicherweise aus Kohlenwasserstoffverbindungen, die mit sogenannten Additiven angereichert werden (z. B. Schwefel), welche die Klopfestigkeit erhöhen sollen.

Die zweite Art der Verbrennung ist die *anomale* Verbrennung. Im folgenden seien nur zwei Arten der anomalen Verbrennung genannt. Findet vor der eigentlichen Zündung durch die Zündkerze eine Verbrennung der im Zylinder befindlichen Ablagerungen statt, nennt man diese Art der anomalen Verbrennung **Glühzündung**. Entzündet sich dagegen ein Gemischrest im Zylinder nach der eigentlichen Zündung durch die Zündkerze aber vor Erreichen der eigentlichen Flammenfront selbst, so nennt man diesen Vorgang **Klopfen**. Bei der normalen Verbrennung erreicht die Flammenfront Geschwindigkeiten von ca. 10 m/s, bei der klopfenden Verbrennung hingegen wurden deutlich höhere Flammengeschwindigkeiten festgestellt (bis zu 2200 m/s), die im Zylinder für stark erhöhte Temperaturen und Drücke sorgen.

## **2. Die klopfende Verbrennung im Detail**

Im Zylinder wird das Kraftstoff-/Luftgemisch durch den Kolben und die Flammenfront verdichtet und es finden Vorreaktionen statt, bei denen einzelne Kraftstoffkomponenten oxidieren oder Kraftstoffmoleküle zerfallen.

Die Flammenfront verdichtet das unverbrannte Gasgemisch zusätzlich und es entstehen hohe Drücke und Temperaturen, die an kritischen Stellen im Zylinder Selbstzündungen des Gemischrestes hervorrufen, noch bevor die eigentliche Flammenfront der Zündkerze diese, relativ weit von der Zündkerze entfernten Orte, erreicht hat (s. Abb.1).

Kettenreaktionen dieser Selbstzündung lösen weitere Flammenfronten aus, die sehr schnell das Restgas verbrennen. Diese Verbrennung regt Druckschwingungen an, die auch in den Körperschall des Motorgehäuses übertragen werden und dort bei niedrigen Drehzahlen deutlich hörbar sind (klopfendes Geräusch). Die Frequenzen dieser Druckschwingungen werden durch die Motorgeometrie bestimmt, und liegen zwischen 6 und 25 kHz.



## 2.2. Regelung der klopfenden Verbrennung

Es gibt verschiedene Parameter, die die Klopfneigung des Motors beeinflussen. Zunächst bestimmen Unterschiede in der Kühlung und Gemischzusammensetzung bzw. -homogenität die Neigung des Motors zum Klopfen. Weiterhin spielen die geometrischen Abmessungen jedes einzelnen Zylinders in Bezug auf die Klopfneigung eine große Rolle, weswegen eine zylinderselektive Zündwinkeleinstellung als Klopfregelung wünschenswert ist. Parameter, die zur Optimierung variiert werden können, sind zum einen das Verdichtungsverhältnis des Gases und zum anderen die Veränderung des Zündzeitpunktes.

Das Verdichtungsverhältnis beschreibt den Quotienten von Brennraumvolumen am oberen Totpunkt zum Brennraumvolumen am unteren Totpunkt. Für eine optimale Ausnutzung der Motorleistung, muss das Verdichtungsverhältnis entsprechend erhöht werden, was allerdings ebenfalls eine Erhöhung der Klopfwahrscheinlichkeit zur Folge hat.

Die Veränderung des Zündzeitpunktes wird nun durch das oben schon angesprochene Verfahren der zylinderselektiven Zündwinkeleinstellung vorgenommen. Dazu werden verschiedene Last-Drehzahl-Kennlinien für zulässige Zündwinkel als Referenz aufgenommen. Danach wird jede Verbrennung analysiert und verglichen.

Trägt man wie in Abb. 3 zu sehen, den Kurbelwinkel über dem Druck auf, so erkennt man bei der klopfenden Verbrennung die Unregelmäßigkeiten im Kurvenverlauf. Je früher die Zündung erfolgt, desto besser ist die Ausnutzung der Motorleistung und desto höher wird die Klopfwahrscheinlichkeit. Also stellt man bei diesem Regelungsverfahren den Zündzeitpunkt adaptiv ein, und zwar wird solange nach früh (um  $0,3^\circ$  bis  $1,5^\circ$ ) verschoben, bis in einem Verbrennungszyklus Klopfen erkannt wird. Dann wird der Zündwinkel wieder nach spät (um  $1,5^\circ$  oder  $3^\circ$  bis  $5^\circ$ ) verschoben. Mit diesem Verfahren wird für jeden Verbrennungszyklus der optimale Wirkungsgrad des Motors approximiert.

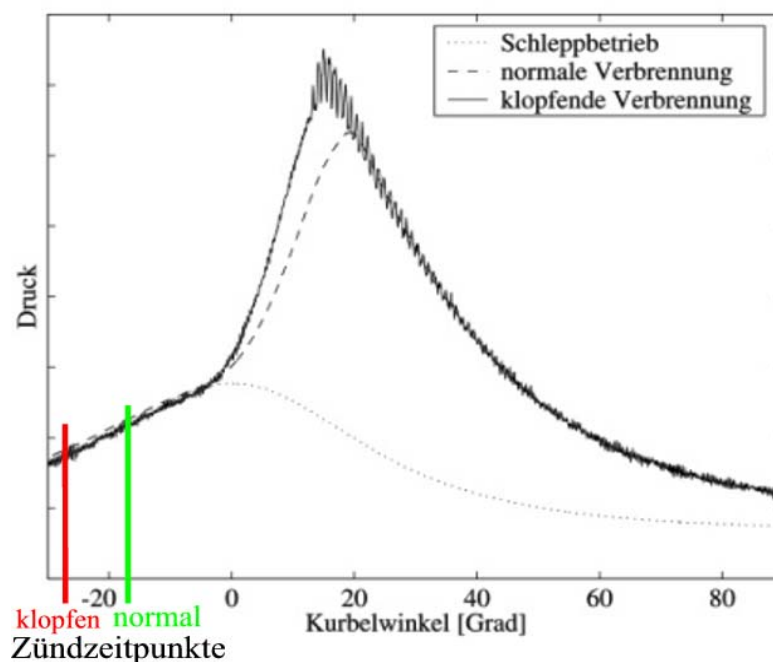


Abb.3

### 3. Zeit- Frequenz-Diagramm von Brennraumresonanzen

Wie schon unter Punkt 2 erwähnt, entstehen durch die klopfende Verbrennung im Brennraum Druckresonanzen. Aus gemessenen Werten können u. a. mit Hilfe der Kurzzeit-Fouriertransformation bzw. der Wigner-Ville-Verteilung sogenannte Zeit-Frequenz-Diagramme erstellt werden.

Die Kurzzeit-Fouriertransformation beinhaltet eine Fensterfunktion, welche eine Art Unschärferelation zwischen den abhängigen Größen Zeit und Frequenz hervorruft. Die Wigner-Ville-Verteilung besitzt ebenso eine Fensterfunktion, die allerdings nur noch von der Frequenzauflösung abhängt. Aber auch hier treten unerwünschte Kreuzterme auf, die die Darstellung verwischen.

Die geeignetste Methode um Zeit-Frequenz-Diagramme zu erstellen, ist die S-Methode, die sich im wesentlichen aus den genannten Funktionen herleiten lässt, hier aber nicht näher behandelt werden soll.

In Abb. 4 erkennt man die ausgezeichneten Streifen als Resonanzen mit entsprechender Frequenz. Ebenfalls ist deutlich zu erkennen, dass der Drucksensor erheblich mehr Resonanzen detektiert als der Körperschallsensor und dass das Zeit-Frequenz-Diagramm die Resonanzen des Körperschallsignals verzerrt und gestört darstellt.

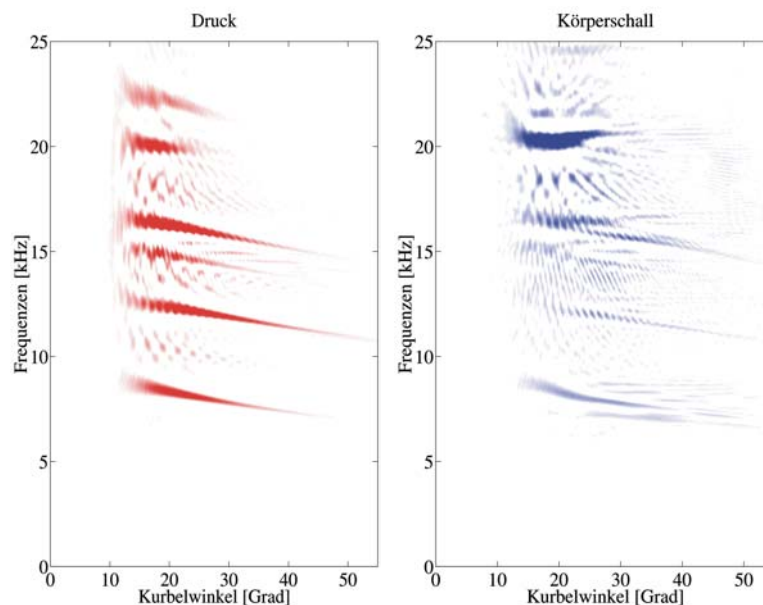


Abb.4: Zeit-Frequenz-Diagramme eines Druck- bzw. Körperschallsensors

### 4. FEM-Modell zur Simulation von Brennraumresonanzen

Um nun geeignete Positionen für die Sensoren im Brennraum zu finden, bedient man sich der Finiten Element Methode. Dazu vermascht man zunächst wie in Abb. 5 ersichtlich den Zylinder und legt die Positionen für die (drei) virtuellen Sensoren fest. Zur Analyse wurde zunächst nur der obere Teil des Zylinders bei einer Kolbenposition von 10mm stationär betrachtet. Mit dieser Betrachtung hat man zunächst die kritischen Stellen im Bereich des Ein- bzw. Auslassventils des Zylinders erfasst.

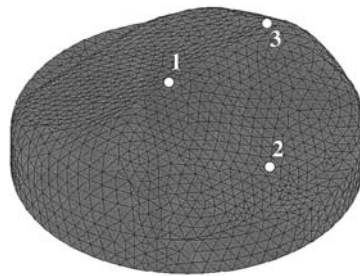


Abb.5: FEM-Modell des Brennraums bei einer Kolbenposition von 10 mm mit den Positionen dreier virtueller Drucksensoren: 1: Kerzensensor, 2:Dachsensor, 3: Giebelsensor

Betrachtet man die ersten zehn Druckresonanzen, die man mit der Methode bei konstanter Schallgeschwindigkeit darstellen kann, so erkennt man zunächst allgemein, die sich ausbreitenden Druckwellen. Diese haben sogenannte „Druckbäuche“ (helle und dunkle Flächen) und „Druckknoten“ (graue Flächen) (s. Abb. 6).

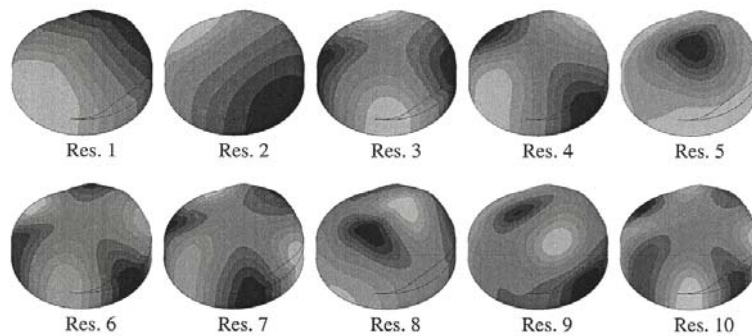


Abb.6: Die ersten 10 Resonanzen (Kolbenposition 10 mm)

Um nun die Abhängigkeit der Druckschwingungen von der Kolbenposition zu erfassen, führt man nun weitere Momentaufnahmen durch. Man erkennt bei der zweiten und vierten Mode zwischen den Positionen 60mm –70mm eine Resonanzmetamorphose (Abb.7). Das bedeutet, dass die Druckschwingungen, beeinflusst von der Zylindergeometrie, ihre Ausbreitungsrichtungen ändern.

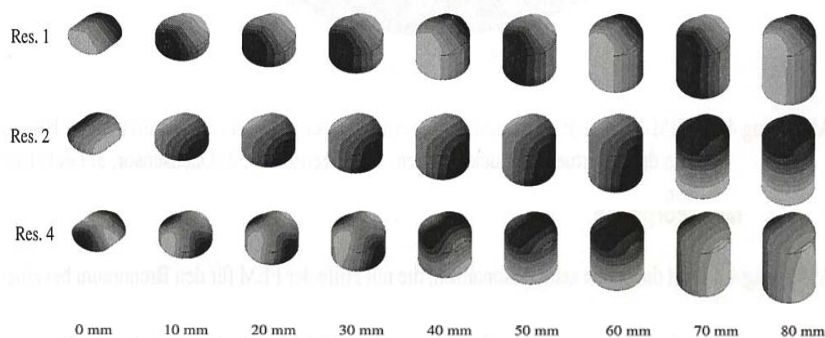


Abb.7: Druckresonanzen für verschiedene Kolbenpositionen

Diese Änderung der Ausbreitungsrichtung der Druckschwingungen ist eine Frequenzmetamorphose die zu einer Frequenzmodulation führt. Denn mit Vergrößerung des Brennraumvolumens durch die Kolbenposition verändert sich die Wellenlänge und damit auch antiproportional die Frequenzen der Druckschwingungen.

### 5. Vergleich von Ergebnissen aus FEM-Analyse und Messung

Vergleicht man die Ergebnisse aus der theoretischen FEM-Analyse und gemessenen Werten und trägt sie in einem Zeit-Frequenz-Diagramm auf, so sieht man z. B. für den auf Position 1 befindlichen Kerzensensor, dass lediglich die Resonanz 5 bei etwa 15 kHz gut erkannt wird, da der Sensor sich im „Druckbauch“ befindet, was noch mal die untenstehende Abb. 9 eingehend erläutert. Außerdem lassen sich die Resonanzmetamorphosen anhand des Diagramms belegen.

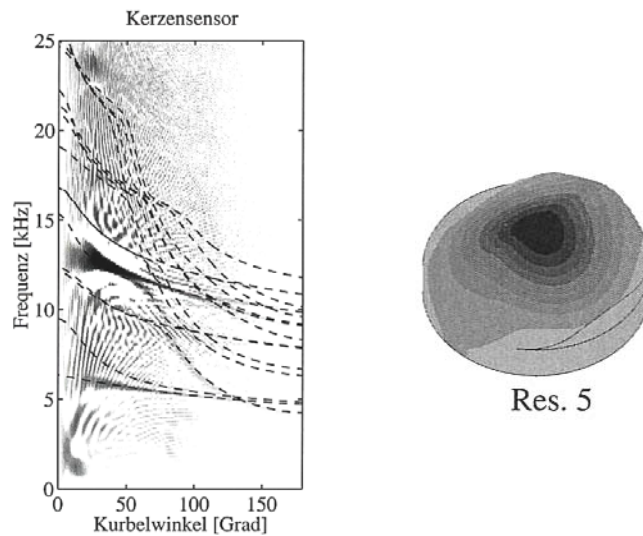


Abb.9: PWVS für das am Ort des Kerzensensor (1) gemessene Drucksignal, überlagert mit ausgewählten und korrigierten Frequenzschätzungen der FEM-Simulation (- -)

Stellt man analoge Überlegungen auch zum Dachsensor (Position 2) an, erkennt man, dass deutlich mehr Resonanzfrequenzen detektiert werden (s.Abb.10).

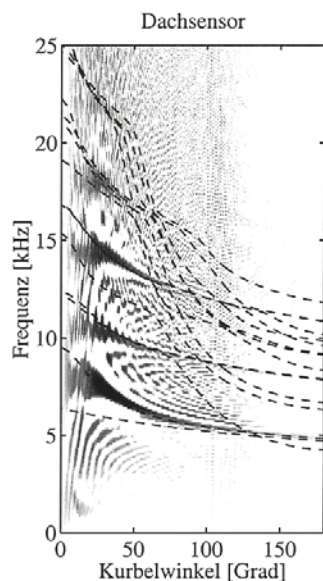


Abb.10: PWVS für das am Ort des Dachsenors (2) gemessene Drucksignal, überlagert mit ausgewählten und korrigierten Frequenzschätzungen der FEM-Simulationen (- -)

## 6. Fazit

Abschließend lässt sich feststellen, dass die Brennraumanalyse mit Hilfe der Finiten Elemente Methode eine brauchbare theoretische Grundlage liefert, um die Vorgänge, die bei der klopfenden Verbrennung im Brennraum ablaufen, zu verstehen und zu verdeutlichen. Es wäre wünschenswert, eine dynamische Vermaschung des Zylinder zu schaffen, die dann z. B. eine gesamte Kolbenbewegung zu jeder Zeit analysieren würde. Der Rechenaufwand hierfür ist allerdings noch zu hoch.

Weiterhin lassen sich diese Ergebnisse dazu verwenden, eine Sensorplatzoptimierung vorzunehmen, so dass Klopfen noch besser erkannt wird.

In der Praxis werden zur Klopfdetektion aus Kostengründen nur Körperschallsensoren eingesetzt, die, wie unter Punkt 3 im Zeit-Frequenz-Diagramm dargestellt, nur mäßige Resonanzerkennung aufweisen. Deshalb werden in der Praxis diese Körperschallsignale gemessen und mit Hilfe mathematischer Methoden auf die entsprechenden Drucksignale zurückgerechnet, um dann mit den theoretischen Auswertungen eine Optimierung vornehmen zu können.