



# **13. Tagung Technische Diagnostik**

## **18. / 19. Oktober 2018**

**Vortrag**

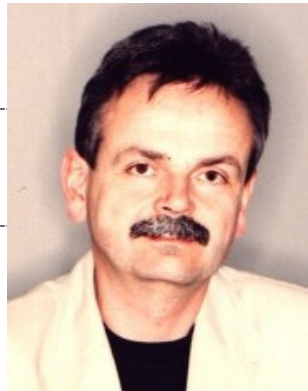
**Modalhammer Wavehit**

**Dr. Gerd Heinz**

**GFaI – Gesellschaft zur Förderung  
angewandter Informatik e.V.**



## Biographische Angaben

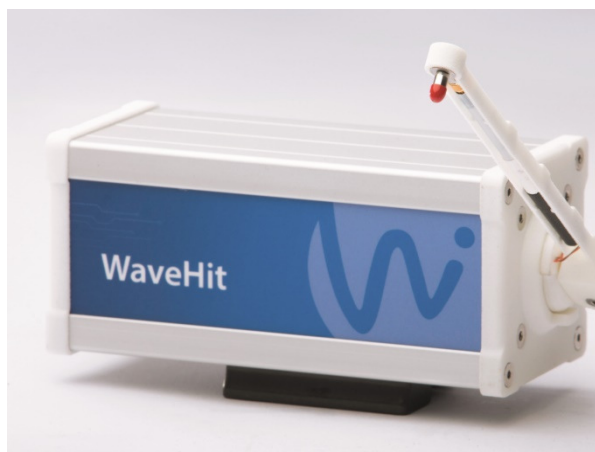
<b>Titel, Vorname, Name</b>	Dr.-Ing. Gerd Heinz	
<b>Funktion</b>	Wiss. Mitarbeiter	
<b>Firma/Einrichtung, Anschrift</b>	GFal e.V. Volmerstr.3 12489 Berlin	
<b>Kontaktdaten</b>	Mail: heinz@gfai.de	
<b>Werdegang</b>	<p>Studium Elektronik-Technologie und Feingerätetechnik TU Dresden Sektion 10 und postgraduales Studium Mikroelektronik TU Dresden Sektion 9</p>	
1972 – 78		
1977 - 87	<p>Mitarbeiter am Institut für Nachrichtentechnik Berlin-Schöneeweide</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Mitarbeit an ersten Mikroprozessoren 1977-79</li> <li>- Entwicklung des ersten Master- Slice IC der DDR 1980 (PCM-Regenerator KA601)</li> <li>- Projektleiter DVS-Schaltkreise 1981-1987</li> <li>- Nationalpreis II im Kollektiv 1987</li> </ul>	
1987-1991	<p>Mitarbeiter am Zentralinstitut für Kybernetik und Informationsprozesse der AdW-ZKI</p>	
ab 1993	<p>Buch „Neuronale Interferenzen“ 1993 Mitarbeiter der GFal Berlin</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Entwicklung der akustischen Photo- und Kinematographie,</li> <li>- Weltmarkteinführung Akustischer Kameras bis 2005</li> <li>- Entwicklung neuer Verfahren und Geräte</li> </ul>	
<b>Forschungsbereiche</b>	<p>Interferenznetzwerke, bildgebende Akustik, Mikroprozessor-Entwicklungen: Schweißtechnik, Wasserqualität etc.</p>	

## Einführung

Im Rahmen der klassischen bzw. experimentellen Modalanalyse spielt die Art der Anregung eine besondere Bedeutung. Die beiden meist verwendeten Arten der Anregung sind die manuelle Modalhammermethode und die elektromagnetische Shakeranregung. In einigen Anwendungen wird auf die Anregung mittels Piezoaktoren und Lautsprecher zurückgegriffen. Seit einiger Zeit gibt es eine neuartige innovative Methode zur Anregung, die die Vorteile der klassischen Anregungsarten vereint. Hierbei handelt es sich um einen elektronisch steuerbaren Modalhammer.

Mit dem elektronisch steuerbaren Modalhammer „WaveHit“ sind reproduzierbare „Single-Hit“- Anregungen mit einstellbarer Energie möglich. Der Modalhammer bietet neuartige und automatisierbare Möglichkeiten zur Durchführung von experimentellen Modalanalysen zum Model Updating eines strukturdynamischen FEA-Modells sowie im Bereich der Wartung und Qualitätssicherung mittels Schallsensoren.

Ein WaveHit- Gesamtsystem bestehend aus einer Softwareoberfläche (Abb.2) und dem Hammer (Abb. 1). Es wurde bewußt intuitiv und einfach gehalten.



**Abb. 1:** Elektronisch steuerbarer Modalhammer „WaveHit“



**Abb. 2:** Softwareoberfläche (GUI) zur Bedienung des Modalhammers

## Motivation

Resonanzeigenschaften verschiedener Gegenstände spielen in unserem Leben eine beachtliche Rolle. Man denke an Resonanzkatastrophen von Brücken, Resonanzfrequenzen von Ottomotoren oder Kaffeemühlen, an das blecherne Scheppern der Kofferraumklappe oder das harmonische Anschlaggeräusch von Glocken.

Um jeweils typische Eigenschwingungsformen an einem zu prüfenden Objekt hervorzurufen, ist eine Anregung mit weißem Rauschen unerlässlich. Ideal wäre die Verwendung von Shakern oder anderen Aktuatoren, wenn diese mechanisch hinreichend vom Objekt entkoppelt werden könnten und wenn diese keine Eigenresonanzen besäßen. Leider ist dies praktisch nur selten gegeben, Shaker und andere Aktuatoren verfälschen die Eigenschwingungsformen des Prüfobjekts oft maßgeblich.

Um dem Ziel unverfälschter Eigenschwingungsformen nahe zu kommen, muß die Erregung breitbandig sein. Auch sollte sie über den Frequenzbereich möglichst konstant sein. Eine mechanische Kopplung von Anregung und Prüfling ist unerwünscht.

Was bleibt, ist die Anregung mittels Dirac-Stoß. Der ideale Dirac-Stoß besitzt ebenfalls ein weißes Rauschspektrum. Manuell betriebene Modalhämmer sind deshalb das Mittel der Wahl. Solange man prellfrei zuschlagen kann, man neudeutsch einen „One Hit“ oder „Single Hit“ schlägt, ist eine bandbegrenzte, weiße Rauschanregung garantiert. Je schwerer der Hammerkopf ist, desto niederfrequenter ist allerdings das Anregungsspektrum (bandbegrenzt).

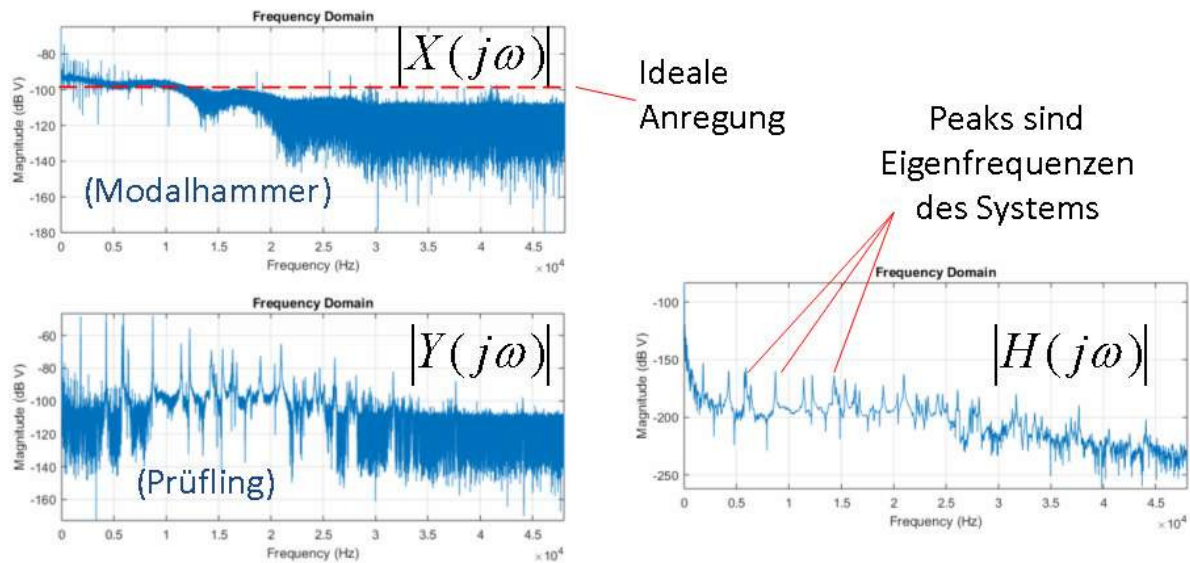
Um sicher zu stellen, daß ein Single Hit geschlagen wurde, besitzen alle manuell zu nutzenden Modalhämmer einen integrierten Hammersensor. Dessen Zeitfunktion verrät uns, ob die Anregung prellfrei und diracförmig war. Es ist zu bemerken, daß die Reproduzierbarkeit eines Schlages oft zu wünschen übrig läßt, da Stärke, Impulsform und Ort des Anschlages oft nicht exakt reproduziert sind. Wird ein Prüfobjekt in einem mehrjährigen Entwicklungsprozeß begleitet, kann fehlende Reproduzierbarkeit zum Problem werden. Unser Bemühen muß einer hohen Reproduzierbarkeit gelten.

## Grundlagen

Grundlage einer Modalanalyse des Prüflings ist die Frequency Response Function – FRF als komplexe Übertragungsfunktion  $H(j\omega)$ . Sie wird aus dem Verhältnis von Antwort  $Y(j\omega)$  zu Erregung  $X(j\omega)$  gebildet. Die Zeitfunktion der Erregung  $X(j\omega)$  wird vom Sensor im Hammer abgenommen, die Zeitfunktion der Antwort  $Y(j\omega)$  am Meßobjekt.

$$(1) \quad H(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)}$$

$H(j\omega)$  hat eine sog. SDOF-Struktur (Single Degree Of Freedom), jede Spitzenamplitude (Peak) ist einem Schwingungsmode zuordenbar, wir sprechen von sogenannten "Resonanzfrequenzen", siehe Beispiel in Abb.3.



**Abb. 3:** Beispiel zur FRF einer mit dem Modalhammer angeschlagenen Türglocke. Die Übertragungsfunktion  $H(j\omega)$  zeigt die charakteristische Eigenfrequenzen des Prüflings.

## Ziele einer Eigenentwicklung

Modalanalyse bedingt *reproduzierbare* Erregungs-Stöße, bei denen der Aufschlagsort, die Aufschlagsenergie und die Erregungsfunktion  $X(j\omega)$  auch nach Monaten reproduziert werden müssen. Als Schwerpunktgebiete sind zu erkennen:

- Gütetests in der Erzeugnisentwicklung
- Serientests in der Produktion
- Langzeit-Tests von Produkten

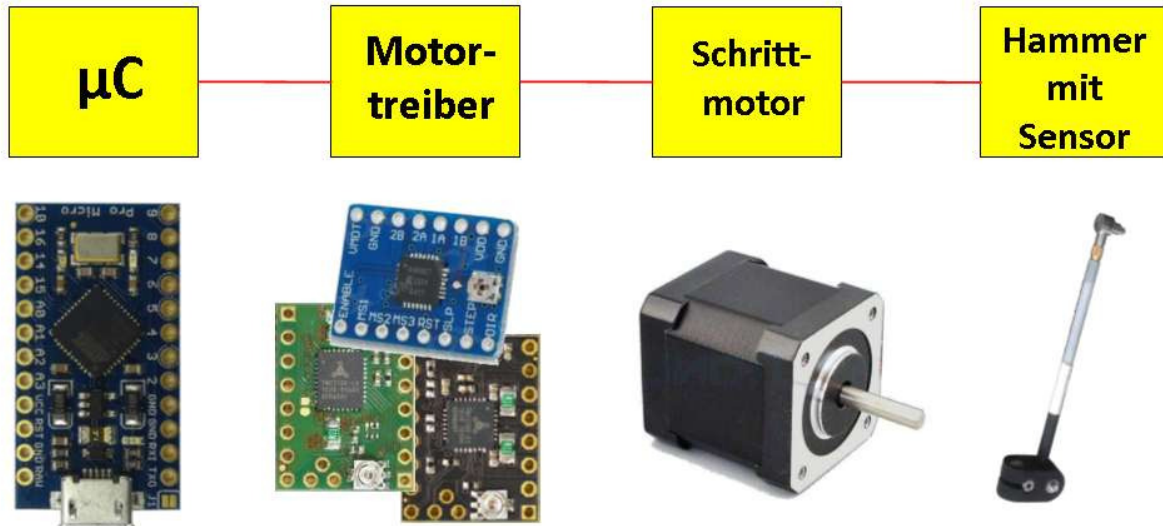
Reproduzierbarkeit bedingt einen automatischen, mechanischen Antrieb. Lange Jahre konnten sich mechanisch angetriebene Hammerkonstruktionen nicht durchsetzen. Erst mit Verfügbarkeit lautlos arbeitender Schrittmotor-Antriebseinheiten ist ein geeigneter Hammerantrieb verfügbar. Pionierarbeiten leisteten auf diesem Gebiet

- Maul-Theet GmbH Berlin
- Prof. Dr. Peter Blaschke, TH Wildau

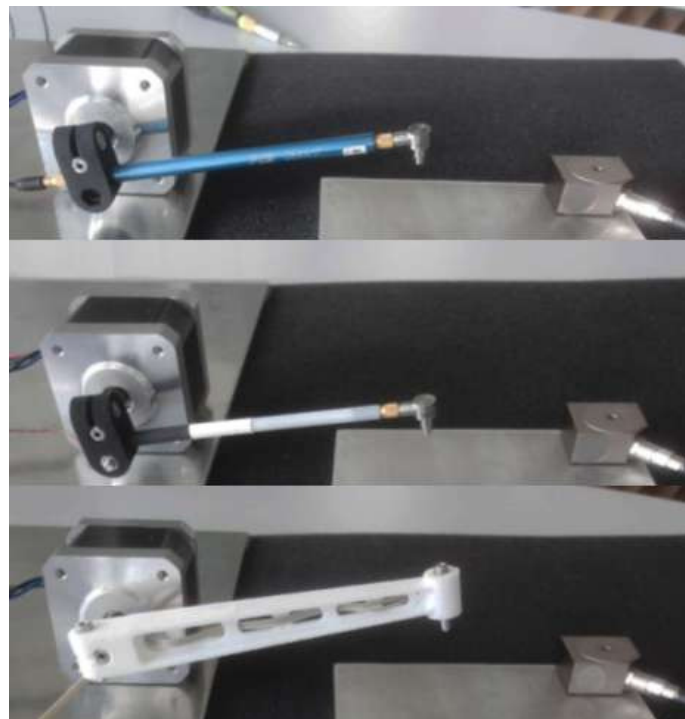
Ziel der Eigenentwicklung war es, den Modalanalyse- Softwarekomplex Wavelmage [1] zu ergänzen und dabei eine Marktnische zu besetzen, die ohne die Nachteile marktüblicher Produkte auskommt. Angestrebt wurden

- Eine hohe Beweglichkeit des Hammer-Arms
- Die Vermeidung proprietärer Softwarepakete (Trinamic [2] ~ 270 MB)
- Eine effiziente und einfache Fertigung und geringe Selbstkosten

- Eine externe Triggermöglichkeit
- Eine flexible Anpaßbarkeit der Firmware an Kundenwünsche
- USB-Kommunikation und automatische USB- Installation unter Windows
- Ein weiter Dynamikbereich (variable Aufschlagsenergie) ohne Neujustage



**Abb. 4:** Experimentelles Entwicklungssystem für erste Versuche.



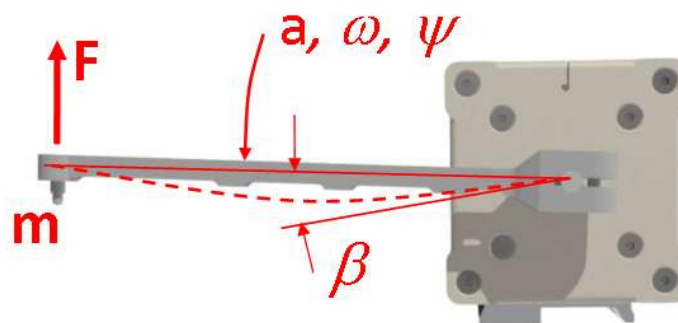
**Abb. 5:** Erprobung verschiedener Hammerarme: von oben nach unten: Arm mit Aluminiumrohr; als Plast-Röhrchen; steifer, leichter Arm als 3d-Druck.

## Erste Versuche

Aus Einzelkomponenten wurde ein Entwicklungssystem zusammengestellt, siehe Fig.4. Verschiedene Hammerkonstruktionen konnten damit erprobt werden, Fig.5. Erste Softwareversuche erfolgten auf einem Arduino-Micro mit einem Motortreibermodul Allegro A4988. Es folgten Experimente mit verschiedenen Armen und Beschleunigungskurven und mit Variation der Drehrichtungsumkehr vor/nach dem Aufschlagszeitpunkt (Offset).

Schnell zeigte sich, daß es unmöglich ist, einen Single-Hit zu schlagen. Der Hammersensor zeigte stets und ständig Prellen an. Beste Ergebnisse brachte das weiche "Trinkröhrchen". Wie ist dieses System zu abstrahieren? Aufkommende Vermutung wurde: Je steifer der Arm ist, desto mehr prellt die Anordnung; je weicher der Arm ist, desto weniger.

Schnell wurde klar, daß es nur zwei Möglichkeiten gibt: Entweder, die Drehrichtung wird umgeschaltet, bevor der Hammerkopf auftrifft, oder sie wird umgeschaltet, nachdem er auftraf. Es leuchtet ein, daß eine Drehrichtungsumkehr nach dem Auftreffen ohne Wirkung ist – der Hammer prellt in der Zeit zwischen Aufprall und Umkehr bereits. Die andere Variante aber, die Drehrichtung umzukehren, bevor der Hammer auftrifft, hat es in sich. Ist der Arm zu steif, schlägt der Hammer nicht mehr auf, sondern dreht vorher um.



**Abb. 6:** Skizze zum elastisch verformten Arm. Unter der Wirkung einer Beschleunigungskraft  $F$  verformt sich der Arm um einen Winkel  $\beta$ .

## Der elastische Arm

Was bedeutet  $F = ma$ ? Kraft ist Masse mal Beschleunigung. Bei konstanter Hammermasse  $m$  ist die auf den Arm einwirkende Biegekraft  $F$  proportional zur Beschleunigung  $a$

$$(2) \quad a(t) = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2\phi}{dt^2} = \frac{F(t)}{m}$$

mit der Kreisgeschwindigkeit  $\omega$ , dem Winkel  $\phi$  und der Zeit  $dt$ . Der Arm wird entsprechend seiner Biegesteife durchgebogen und speichert dabei kinetische Energie. Die Armdurchbiegung  $\beta$  ist proportional zur angreifenden Kraft  $F$ , ebenso zur Beschleunigung  $a$

$$(3) \quad \beta \sim F \sim a.$$

Mit großer Armdurchbiegung wird es möglich, die Drehrichtung *umzukehren*, bevor der Hammer aufschlägt. Der Arm federt über die Neutrallage hinaus durch. Je elastischer der Arm, je größer wird die Durchbiegung, je reproduzierbarer wird ein Single Hit. Dies erklärt, warum zu steife Arme kaum einen Single Hit liefern können.

Denken wir über die Proportionalität zwischen Kraft  $F$  und Beschleunigung  $a$  nach, dann fällt auf, daß beide über die konstante Hammermasse  $m$  verknüpft sind

$$(4) \quad F \sim a.$$

Halten wir die Beschleunigung  $a$  konstant, so halten wir gleichzeitig auch den Winkel  $\beta$  der Durchbiegung des Armes konstant.

$$(5) \quad \beta \sim a$$

Mit anderen Worten: Arbeiten wir mit konstanter Beschleunigung, so bleibt der Winkel  $\beta$  der Durchbiegung des Armes unveränderlich konstant. Dieser Umstand ist interessant. Einerseits wird damit der Umkehrzeitpunkt exakt bestimmbar, andererseits bleibt der Offsetwinkel, d.h. der Winkel der Drehrichtungsumkehr vor Aufschlag, konstant.

Als logische Abfolge für alle Schlagenergien dargestellt können wir aufzeichnen:

$$(6) \quad a \text{ const} \rightarrow F \text{ const.} \rightarrow \text{Durchbiegung } \beta \text{ const.} \rightarrow \text{Offsetwinkel const.}$$

Dieser Gedanke wurde in Hard- und Software fixiert. Als erster Modalhammer arbeitet dieser mit konstanter Beschleunigung für alle Schlagenergien. Die Schlagenergie wird über den Auslenkungswinkel voreingestellt. Somit arbeitet der Hammer mit *konstanter* Beschleunigung bei *variablen* Weg. Damit wird die exakte Einstellung des Offset für verschiedene Aufprallenergien recht einfach: Theoretisch ist das Offset unabhängig von der Energie konstant. Praktisch variiert es dennoch etwas.

## Beschleunigungstabelle

Schrittmotoren bewegen sich stets nur um ein konstantes  $ds$  – den Schritt. Will man die Geschwindigkeit variieren, kann man dies nur über die Verzögerungszeit  $dt$  pro Schritt tun:

$$(7) \quad v = \frac{ds}{dt} = \frac{\text{const}}{dt}$$

Eine Beschleunigungstabelle, in der die Verzögerungszeiten pro Schritt nacheinander gespeichert sind, wird im RAM des Mikrocontrollers abgelegt. Über diese Tabelle (look-up table) holt sich der Mikrocontroller die für jeden nächsten Schritt geforderte Verzögerungszeit. Durchläuft man die gesamte Tabelle, wird der Motor maximal beschleunigt. Benötigt man eine geringere Beschleunigung, wird die Abarbeitung der Tabelle



vorzeitig beendet, siehe Tab.1 und Tab.2. Input der Tabelle ist die Schrittnummer (stepnr), Output ist die halbe Verzögerungszeit für diesen Schritt (delay in  $\mu\text{s}$ ).

**Tab. 1:** *Mikroschritt- Beschleunigungstabelle für 130 Schritte (Beispiel)*

```
uint8_t delaytab(int stepnr) { // (Step-Delay in  $\mu\text{s}$  * 2)
    const static uint8_t dellist[130] = {
        145,122,107,97,89,83,78,74,70,67,\
        64,62,59,57,56,54,53,51,50,49,\
        48,47,46,45,44,43,42,42,41,40,\
        40,39,38,38,37,37,36,36,35,35,\
        35,34,34,33,33,33,32,32,32,31,\
        31,31,30,30,30,30,29,29,29,29,\
        28,28,28,28,27,27,27,27,27,26,\
        26,26,26,26,26,25,25,25,25,25,\
        25,24,24,24,24,24,24,24,23,23,\
        23,23,23,23,23,23,22,22,22,22,\
        22,22,22,22,22,22,21,21,21,21,\
        21,21,21,21,21,21,20,20,20,20,\
        20,20,20,20,20,20,20,20,19,19\
    };
    return( dellist[stepnr]);
}
```

Beschleunigungskurven für optimale Betriebsbedingungen unter  $a = \text{const.}$  wurden im Vorfeld unter SCILAB optimiert. Da ein Schritt aus zwei Pulshälften (High und Low) besteht, ist die halbe Verzögerungszeit eingetragen (symmetrischer Puls). Mit der Tabelle läßt sich für einen Motor mit  $0,9^\circ$  pro Step ein Winkelbereich von 0 bis  $117^\circ$  adressieren.

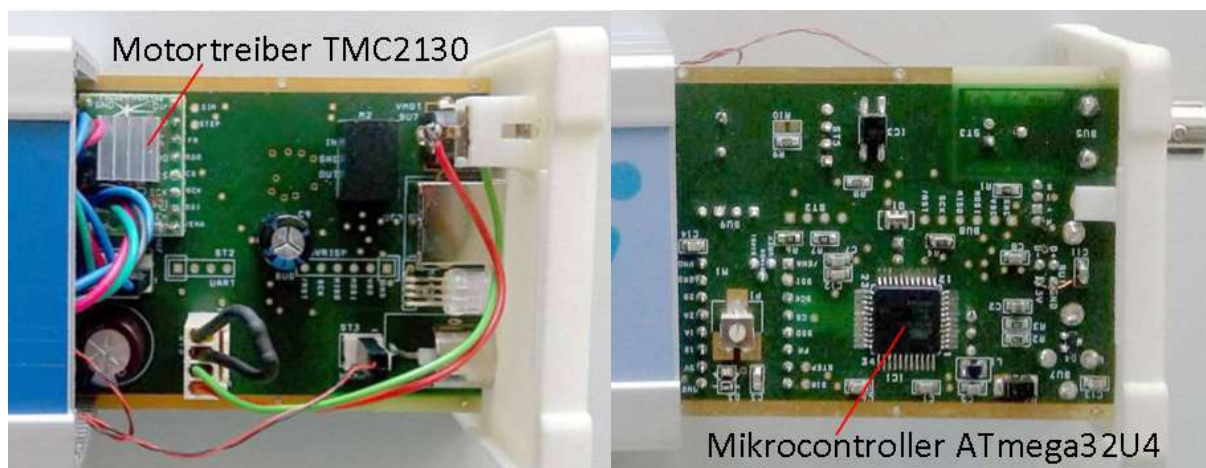
**Tab. 2:** *Algorithmischer Kern zur Abarbeitung der Beschleunigungstabelle*

```
while (stepi < a_value) { // Schlag
    deli = delaytab(stepi); // Delay für Schritt i holen
    while (n < mstp) { // mstp Mikrosteps per Step
        puls(deli); // Motor-Step erzeugen (plus 2  $\mu\text{s}$ )
        n++;
    }
    n=0;
    stepi++; // nächster Schritt
}
```

Je nach Motortreiber werden im einfachsten Fall *mstp* Mikroschritte (z.B. 16) mit dem aktuellen Delay wiederholt. Kommt ein lautloser Motortreiber zum Einsatz (Trinamic), so erzeugt dieser aus dem Delay des jeweils letzten Mikrosteps noch einmal bis zu 256 Nanosteps.

## Hardware

Bei der Konstruktion wurde Wert auf Servicefreundlichkeit durch Einfachheit und Robustheit gelegt. Alle Bauelemente befinden sich auf einer zweilagigen Leiterplatte, zur Steuerung findet ein Mikrocontroller ATmega32U4 [3] mit USB-Port Verwendung. Dieser steuert über einen SPI-Port den Motortreiber Trinamic TMC2130. Als Motor wird ein Typ NEMA17 mit 400 Schritten/Umdrehung verwendet.



**Abb. 7:** Leiterplatte des Modalhammers v3\_SPI von vorn und von hinten.

## Firmware

Beim Modalhammer kamen Motortreiber der Firma Trinamic zum Einsatz. Trinamic bietet Kunden zwar eigene Motortreiber- Schaltkreise an, jedoch sind von diesen nur zwei Typen (TMC2100 und TMC2298) ad hoc nutzbar. Alle anderen müssen beim Start (von außen) initialisiert werden. Leider hält sich Trinamic mit der Veröffentlichung von Initialisierungsscripts etwas zurück. Ebenso sind Beschreibungen in den Datenblättern für Außenstehende wenig verständlich, da nicht erklärt wird, in welcher Abfolge Dinge zu tun sind und welcher Begriff zu welchem in Bezug steht. Zwar findet man im Web Bibliotheken für einige Motortreiber, allerdings sind diese sehr komplex und i.a. auch unkommentiert.

Wer Treiber von Trinamic nutzen will, tut also gut daran, den kompletten Motormodul mit Elektronik von Trinamic zu kaufen und das komplette Entwicklungssystem samt Sprache (TMCL) zu verwenden und an den Kunden weiterzugeben.

Der Ehrgeiz des Autors bestand darin, dies nicht zu tun und einen TMC2130 pur zu programmieren. Die Vorteile für Hersteller und Kunden liegen auf der Hand: Es sind nur zwei Schaltkreise vonnöten (Mikrocontroller und Motortreiber) und es ist keine Installation der gigantischen Softwareumgebung von Trinamic (>300 Megabyte) beim Kunden erforderlich. Die Firmware des Hammers muß nicht einmal installiert werden, da ein serieller Port-Standard (usbser) bedient wird.



**Abb. 8:** Rückseite des Hammers mit Bedienelementen

Die Bedienung des Hammers ist so angelegt, daß sich der Hammer menschenverständlich über USB-VCP (virtueller COM-Port, serielle Schnittstelle) äußert. Die Rückgaben des Hammers entsprechen bestimmten Regeln, sodaß sie auch über die Windows-Oberfläche des Modalhammers unter Wavelmage gelesen werden können, Tab.3.

**Tab. 3:** Kommunikation über das USB-VCP Interface des Hammers unter PuTTY

```
>?
Welcome! Type h for help!
>h
Modal Hammer WaveHit
USB-VCP, 115200 baud, 8n1n
moha_v33 for PCB MOHA_v3
Nov 27 2017 16:50:23 AIDE 1.8.3
To start:
- set the hit acceleration to a00...a99
```

- press d for touch-down
- beat with f, space, n or x
- achieve a one-hit with o or j functions

**Commands:**

**h:** this help  
**p:** show parameters  
**a..:** set acceleration (a00...a99)  
**d:** touch down and go back to start  
**g:** go to start position  
**+:** offset justage step  
**-:** offset justage step  
**o..:** set offset justage steps (o-9...o+9)  
**j..:** set reversion delay (j00...j99)\*8 in µsec  
**f:** (or space key): fire  
**n:** cyclic repetition  
**x:** infinite repetition demo  
**t:** test variables on/off  
**r:** read parameters from EEPROM  
**s:** save parameters to EEPROM  
**z:** read motor driver vref

**login/logout:**

**?:** enable communication - answer: Welcome...  
**#:** disable communication - answer: Bye...

## Kommunikation unter Windows

Der Modalhammer bietet drei verschiedene Interfaces zur Kommunikation an: Zum Upload von Programmcode unter Windows einen Arduino/Catarina USB- Bootlader [4], zur Kommunikation einen virtuellen USB COM-Port [5] (USB-VCP, Dienst „usbser“ unter libusb) und zum Umladen des Bootladers eine AVR-ISP-mkII Buchse im Innern, über die der Bootlader selbst installiert wird.

Der Kunde kann über zweierlei Art kommunizieren.

Für den Servicebetrieb ist lediglich ein Terminalprogramm (PuTTY, Hyperterm o.ä.) erforderlich. Beim Anstecken an den Windows-PC meldet sich der Modalhammer unter seiner USB Vendor ID (VID) 2FF1 und seiner Product-ID (PID) 7801 automatisch als serieller Port an. Die VID 2FF1 gehört der gfai tech GmbH.

Ab Windows9 meldet sich der Hammer auch bei Erstinstallation automatisch an. Die Erstinstallation unter Windows7 und 8 ist nicht ganz trivial, dazu existiert eine spezielle Anleitung.



**Abb. 9:** Anmeldung des Modalhammers unter WindowsXP

Unter PuTTY ist lediglich die Baudrate (115200) und die serielle Bitkonfiguration (8n1n) einzustellen. Unter Windows kann über die Wavelmage GUI (Abb.2) direkt kommuniziert werden.

Da alle modernen Compiler oder Entwicklungsumgebungen (Java, Labview, Matlab...) über Zugriffsfunktionen auf eine serielle Schnittstelle verfügen, kann der Anwender auf einfachste Weise eigene Implementierungen für den Hammer entwickeln. Dies erscheint z.B. für Serienprüfungen sehr nützlich.

Auf Kundenwunsch kann eine spezielle Buchse eingebaut werden, über die der Hammer extern ausgelöst werden kann.

## Arbeit mit dem Hammer

Nach USB-Verbindung und Anstecken des Netzteils verbindet sich Windows automatisch mit dem Hammer, es ertönt das typische Windows- „Ding-Dong“ und die RGB\_LED des Hammers leuchtet rot auf.

### Terminalprogramm

Soll der Hammer über ein serielles Terminal (z.B. PuTTY) betrieben werden, sind Baudrate (115200 Baud) und Bitkonfiguration (8n1n) im Terminalprogramm einzustellen. Der Hammer

beginnt zu kommunizieren, sobald er ein Fragezeichen erhält. Er meldet sich mit „Welcome! Type h for help!“, die LED-Farbe wechselt auf grün.

Zunächst ist die Schlagenergie über die Funktion a einzustellen. Da mit stets konstanter Beschleunigung gearbeitet wird, wird diese über die Auslenkung des Hammers im Bereich von 30 bis 130 Steps gestellt.

- Mit der Funktion d holt sich der Hammer den Nullpunkt.
- Danach kann mit der Funktion f geschlagen werden.
- Sollte der Hammer prellen, wird der Offsetwinkel mit der Funktion o korrigiert.

Der Hammer gibt bei der Einstellung des Schlagwinkels einige typische Werte aus, siehe Tab.4. Um sämtliche Parameter einzusehen, bietet sich die Funktion p an, siehe Tab.3. Zum Debugging der Arbeitsweise des Hammers existiert eine Testfunktion t, diese gibt das Timing jedes Winkelschritts aus.

Die jeweils letzten Einstellwerte (Winkel, Offset etc.) werden mit der Funktion s im EEPROM des Mikrocontrollers gespeichert. Diese letzten Werte werden beim nächsten Bootvorgang automatisch geladen, der Hammer „erinnert sich“ an die letzte Sitzung.

**Tab. 4:** *Rückgabewerte bei einer Schlageinstellung mit der Funktion a*

```
>a99
[steps] 129 {gon};
[angle] 116.1 {deg};
[offset] 2 {gon};
[sum] 131 {gon};
[step_duration] 40.40 {us};
[hitspeed] 3.01 {m/s};
[energy] 25.0 {mJ};
[rdy]
```

#### *Windows-GUI*

Die bereitgestellte Windows-Oberfläche ist selbsterklärend. Hier wird der Hammerarm interaktiv auf den gewünschten Schlagwinkel eingestellt. Über Buttons können das Offset korrigiert werden, ein Schlag kann ausgelöst werden oder der Nullpunkt kann neu geholt werden.

## Hitparade

Am 1. November 2017 konnten die ersten 32 aufeinanderfolgenden, prellfreien Anschläge (Single-Hits) geschlagen und aufgezeichnet werden. Der Streubereich der Amplituden liegt abhängig von der Stabilität des Stativs und der Anordnung um +/- 8%.

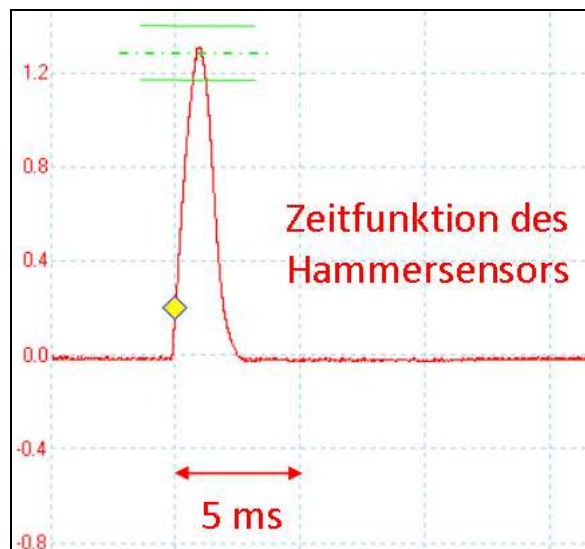


Abb. 10: Zeitfunktion eines Single Hits vom Hammersensor kommend.

## Perspektive

Bislang wurden zwei Typen von Modalhämmern entwickelt. Der erste besitzt einen Treibermodul mit dem Schaltkreis TMC2100 [6] von Trinamic. Der zweite arbeitet mit einem TMC2130 [7]. Dieser besitzt einen eingebauten Stromsensor. Damit ist eine Stall-Detection möglich. Derzeit wird für schwere Hammerköpfe ein dritter Hammer entwickelt.

## Zusammenfassung

Zu einer Verbesserung der Reproduzierbarkeit modaler Anregung wurden zur Software Wavelmage passend zwei neuartige Modalhämmer entwickelt, die sich durch einfache Konstruktion und ein neues Verfahren zur Gewährleistung von geringem Offset auszeichnen. Einfachste Bedienung und komfortable Kommunikation ist über eine serielle USB-VCP Terminal-Schnittstelle und über eine graphische Windows-Oberfläche (GUI) gegeben.

## Quellen

- [1] Heimseite der Software zur Modalanalyse WaveImage <https://wave-image.de>
- [2] Download TMCL-IDE von Trinamic: <https://www.trinamic.com/support/software/tmcl-ide/>
- [3] Datasheet ATmega32U4: <https://www.microchip.com/wwwproducts/en/ATmega32U4>
- [4] Arduino-Catarina-Bootloader siehe [https://github.com/ ATmega32U4-bootloader](https://github.com/ATmega32U4-bootloader)
- [5] USB-VCP siehe [https://en.wikipedia.org/wiki/USB\\_communications\\_device\\_class](https://en.wikipedia.org/wiki/USB_communications_device_class)
- [6] [https://www.trinamic.com/fileadmin/assets/Products/ICs\\_Documents/TMC2100\\_datasheet.pdf](https://www.trinamic.com/fileadmin/assets/Products/ICs_Documents/TMC2100_datasheet.pdf)
- [7] [https://www.trinamic.com/fileadmin/assets/Products/ICs\\_Documents/TMC2130\\_datasheet.pdf](https://www.trinamic.com/fileadmin/assets/Products/ICs_Documents/TMC2130_datasheet.pdf)

## Erstellt

Heinz, G.: Modalhammer Wavehit. Tagungsband 13. Tagung Technische Diagnostik  
HS Merseburg, 18. / 19. Oktober 2018