

MOSTAB und D-MOSTAB, ein Vergleich

K. H. Meß, FEB

Juni 98

Ziele

Die Regeleinheiten zur Stabilisierung der Monochromatoren sind seit nahezu 20 Jahren erfolgreich im Einsatz. Sie bestehen im Wesentlichen aus einem Filter, einem Vergleicher und einer Hochspannungskaskade, die als Klasse D Verstärker benutzt wird. Der Vergleicher verändert die Hochspannung in Abhängigkeit von der Differenz zwischen einem eingestellten Referenzwert und der gefilterten Eingangsamplitude. Alternativ kann die gewünschte Ausgangsspannung direkt eingestellt werden. Im normalen Betrieb ermittelt der Experimentator von Hand die maximale Amplitude des Reflexes und stellt dann die Referenzspannung auf den gewünschten Bruchteil. Per Schalter wird entschieden, ob man die linke oder rechte Flanke der sogenannten Rockingkurve wünscht. Man bemerke, daß der MOSTAB auf eine feste Eingangsspannung stabilisiert, nicht aber auf ein festes Verhältnis Eingangsspannung/Peakschwingung. Insbesondere wenn die Strahlenergie verändert wird und sich damit die Strahlintensität hinter dem Monochromator ändert, wird auf eine feste Amplitude geregelt, die höher sein kann, als die bei der derzeitigen Energie maximal mögliche. Damit ist dann keine Regelung mehr möglich und der MOSTAB „rastet“ aus. Da der MOSTAB etwas bejährt ist, wurde an FEB der Wunsch nach einer Nachfolgelösung herangetragen. Nun hat sich in all den Jahren an der Charakteristik der zu regelnden Strecke wenig oder nichts geändert. Bei einem vergleichbaren Regelalgorithmus (z.B. PI oder PID) wird sich auch am Regelverhalten wenig verbessern lassen. Verbesserungen können eigentlich nur erhofft werden, wenn das Nachfolgegerät mit mehr Informationen versorgt werden kann, so daß der Regelung eine Steuerung überlagert werden kann. Deswegen wird eine Lösung, von Herrn Brüggmann D-MOSTAB getauft, mit einem DSP (digitalen Signalprozessor) vorgeschlagen. Der Prozessor erlaubt mehr Flexibilität im Algorithmus und auch eine Kommunikation mit dem Steuerrechner des Experiments. Zum Beispiel könnte bei Kenntnis der augenblicklichen Strahlenergie und bei Kenntnis der zu erwartenden maximalen Intensität bei dieser Energie, basierend auf einer vorherigen Messung, wirklich auf eine konstante Spektralreinheit während des Energiefahrens geregelt werden. Da die Kommunikation mit dem Experiment noch nicht zur Verfügung steht, beschränkt sich dieser Vergleich auf die Reglereigenschaften. Damit ist aber, wie angedeutet, das Potential des vorgeschlagenen Nachfolgesystems keineswegs ausgeschöpft.

Testaufbau

Im April und Mai wurde Testzeit am Strahl X1 zur Verfügung gestellt, um den (halbfertigen) D-MOSTAB mit dem am Strahl vorhandenen MOSTAB zu vergleichen. Abbildung 1 zeigt den Testaufbau.

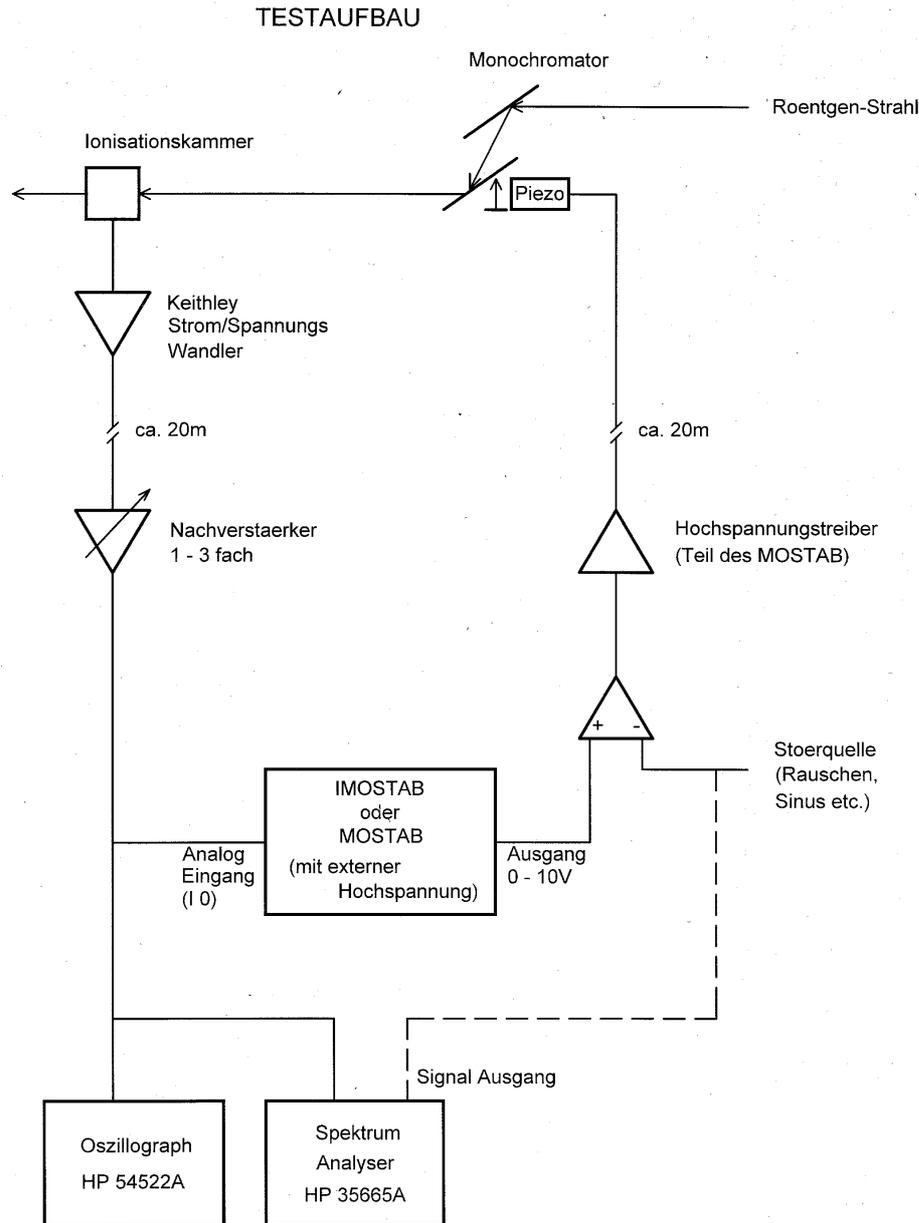


Abb. 1

Der Monochromator wird mit einem Piezo (0-1000V) abgeglichen. Die Abgleichspannung wird vom Hochspannungsteil des MOSTAB erzeugt, weil zum Testzeitpunkt der weitgehend baugleiche Hochspannungsteil des D-MOSTABs noch nicht zur Verfügung stand. Die Intensität des Strahls hinter dem Monochromator wird mit einer Ionisationskammer gemessen. Das Signal wird mit einem Keithley Strom/Spannungswandler verstärkt und ein wenig gefiltert. Die Filterzeitkonstante war zu jeder Zeit des Tests klein gegen alle anderen Filterzeiten und daher vernachlässigbar. Die Strahlintensität kann mit einem Oszillographen oder einem FFT Spektralanalyser gemessen werden. Der Ausgang des Reglers (MOSTAB oder D-MOSTAB) wird über einen Summierer geführt, um Störsignale zusätzlich einschlei-

fen zu können. Beim MOSTAB ist das möglich, weil das 0-10V Steuersignal an der Frontplatte herausgeführt ist und sich, gegebenenfalls modifiziert, auf die externe Hochspannungssteuerung auf der Rückseite aufschalten läßt. (Im digitalen System gibt es natürlich viele Möglichkeiten Störsignale zu erzeugen. Die analoge Methode wurde aus Kompatibilitätsgründen gewählt.)

„Einfangen“ des Peaks

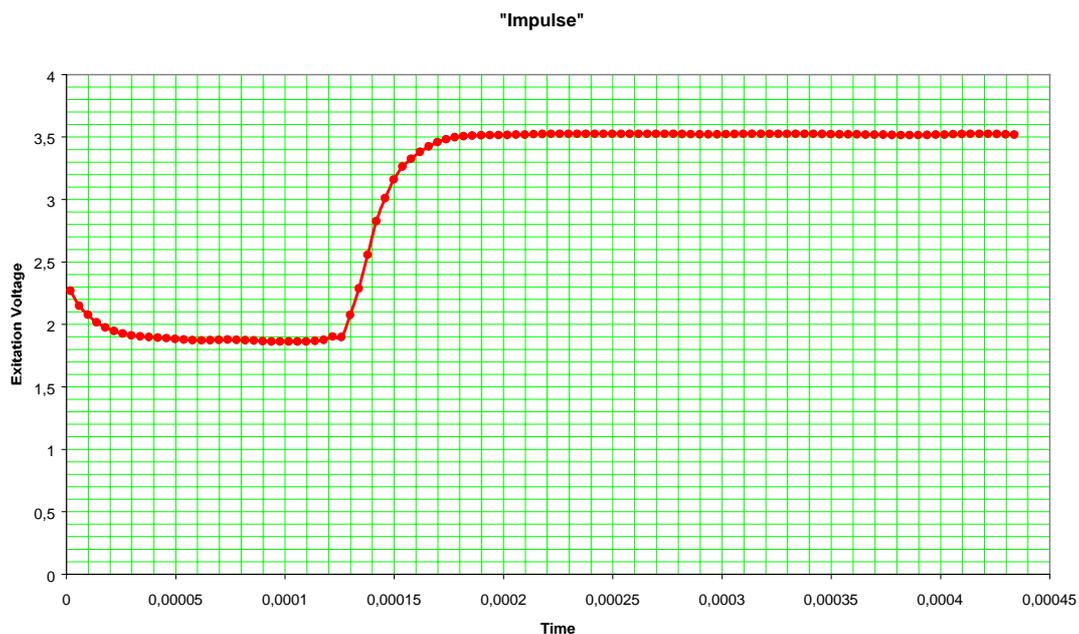
Beim MOSTAB muß die Rockingkurve (Intensität als Funktion der Piezospaltung) von Hand durchfahren werden, um die Referenzspannung festlegen zu können. Der D-MOSTAB sucht automatisch (oder nach Aufforderung via RS232 Interface) nach dem Peak und berechnet die Referenzspannung selbständig aus Peakhöhe und eingestelltem Regelsollwert. Gelingt es nicht den Peak zu finden wird die Suche langsamer wiederholt. Wenn ein Referenzsignal vor dem Monochromator zur Verfügung steht kann automatisch darauf normiert werden. Ist das Referenzsignal sehr klein (z.B. kein Strahl) wird automatisch die Peaksuche unterbrochen bis wieder Strahl vorhanden ist. Im Test wurde auf den DORIS Strom normiert.

In aller Regel wird der Peak auf Antrieb gefunden. Da aber die optimalen Regelparameter, wie später diskutiert wird, von der Strahlenergie abhängen, kann es notwendig sein, die voreingestellte Verstärkung etwas zu reduzieren. Alternativ könnte die Regelverstärkung, energieabhängig, vom Experimente Computer geladen werden.

Impulsantwort der Regelstrecke

Da das Fourierspektrum eines Dirac Impulses alle Frequenzen enthält, kann man auf einfache Weise das Frequenzverhalten einer zu regelnden Strecke (Prozeß) durch Anregung mit einem Impuls bestimmen. Aus praktischen Gründen muß der Impuls allerdings eine gewisse Länge haben, weil sonst die Trägheit gar nicht überwunden wird. Im Prinzip wird das durch eine passende Erhöhung der Amplitude kompensiert. Das ist hier erstens gefährlich und zweitens führt es nicht zu einer Erhöhung des Ausgangssignals. Die gaussförmige Rockingkurve ist eben hochgradig nichtlinear.

Abbildung 2 zeigt den 0.14 ms langen und 1.5V hohen Impuls.



Die Impulsantwort wurde für über 6 Sekunden aufgezeichnet. Abbildung 3 zeigt die ersten 30ms.

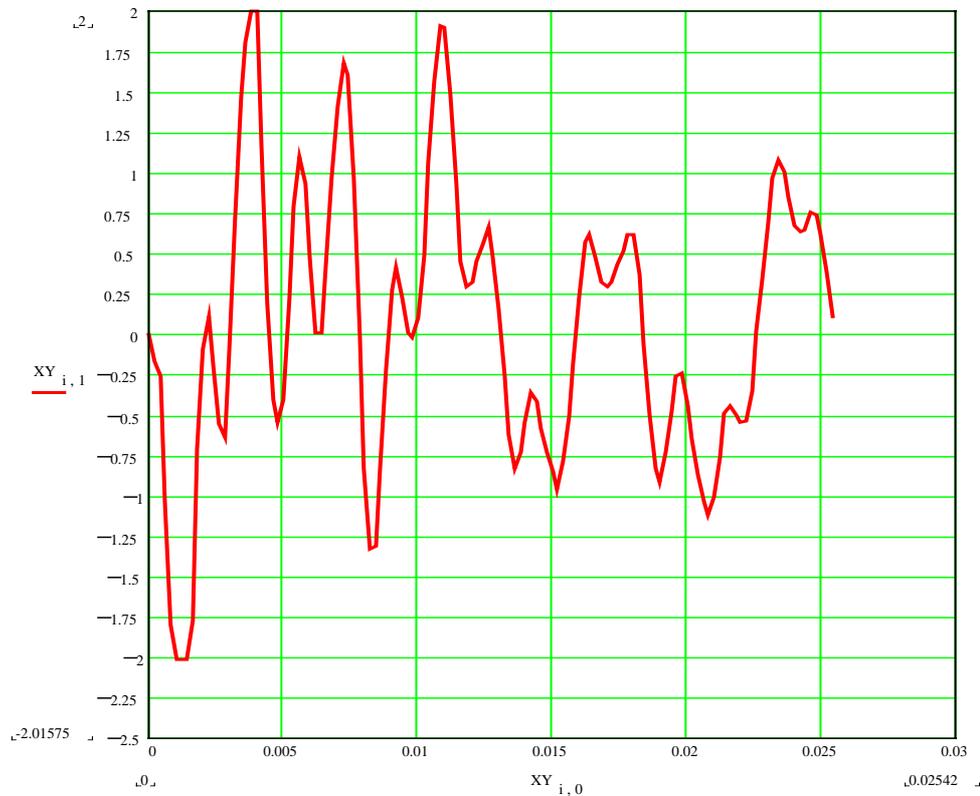


Abbildung 3 Strahlintensität nach dem Monochromator nach der Impulsanregung, 30 ms

Wie dem Spektrum, Abb. 4, zu entnehmen ist werden Frequenzen um 550 und 160 Hz angeregt.

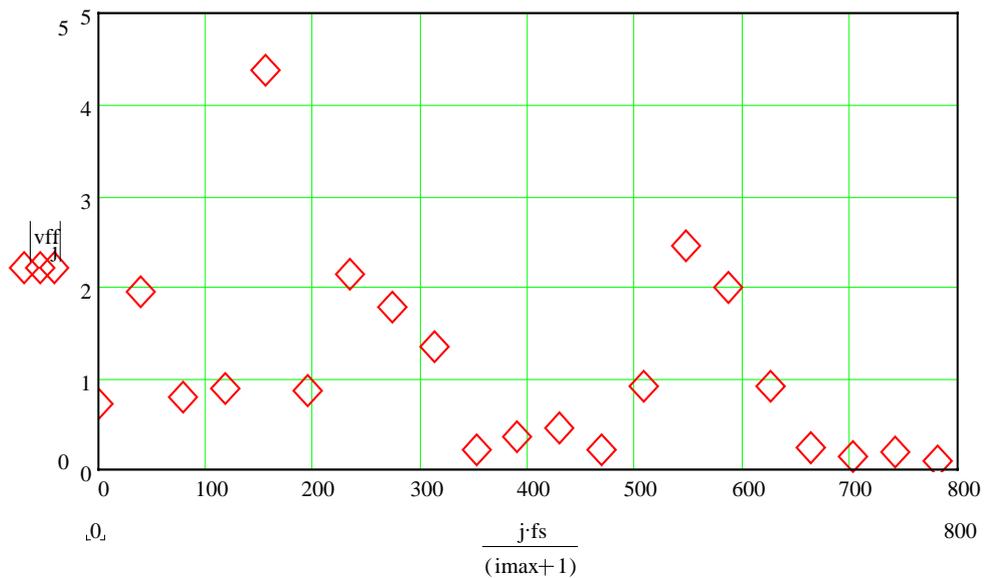


Abbildung 4 Spektrum der Impulsantwort, gemittelt über 30 ms

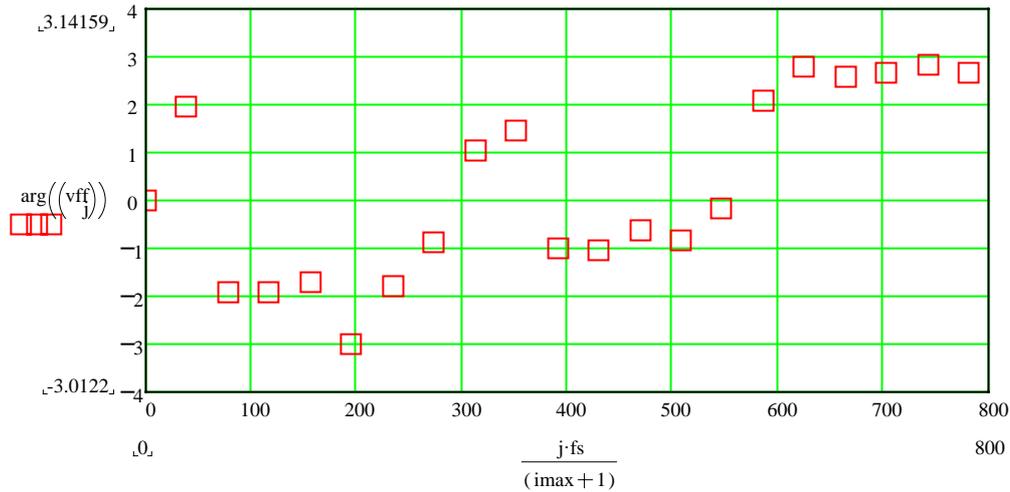


Abbildung 5 Phasen des Spektrums der Impulsantwort, gemittelt über 30 ms

Nach 50ms hat sich die 160 Hz Komponente stabilisiert und ist dominant. Weiterhin wird bei 250 und bei wenigen Hz etwas angeregt, jeweils auch bestätigt vom Durchgang der Phase durch 0. (Abb. 6-8)

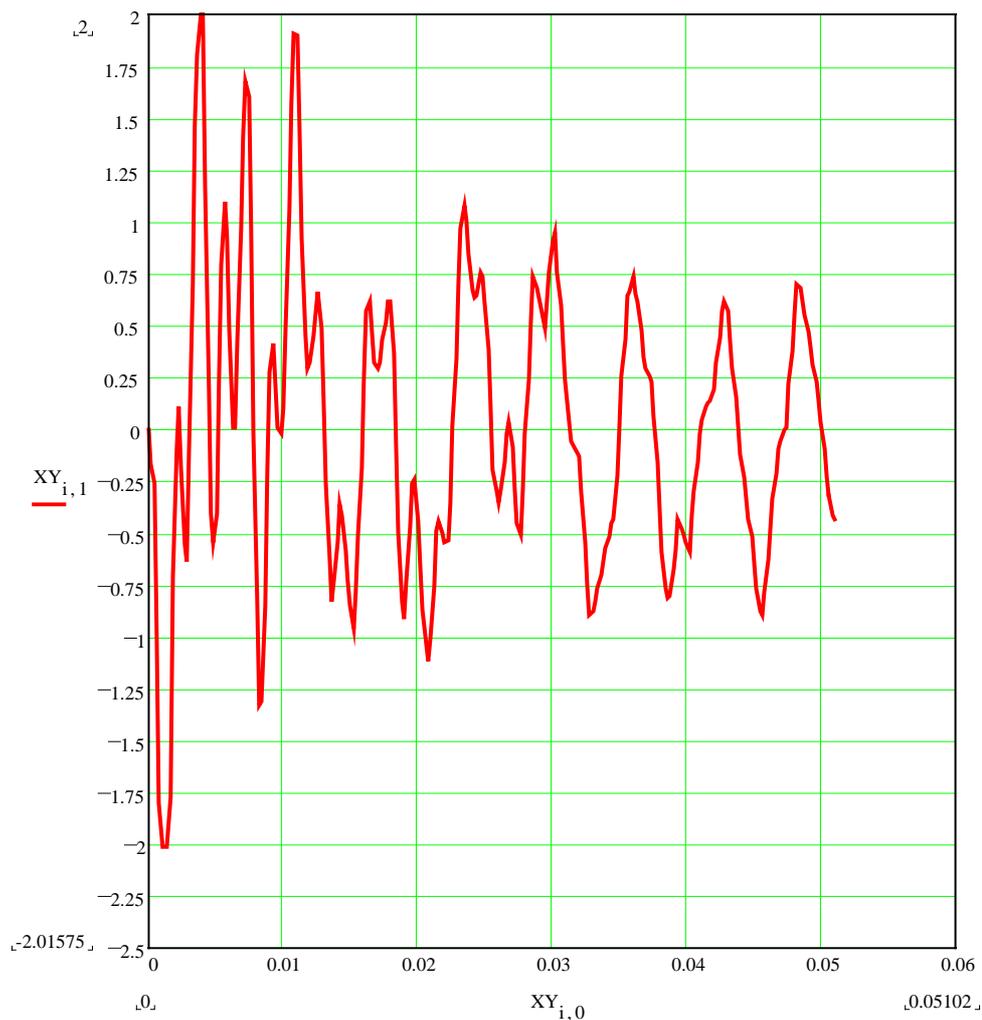


Abbildung 6 Impulsantwort, 50 ms

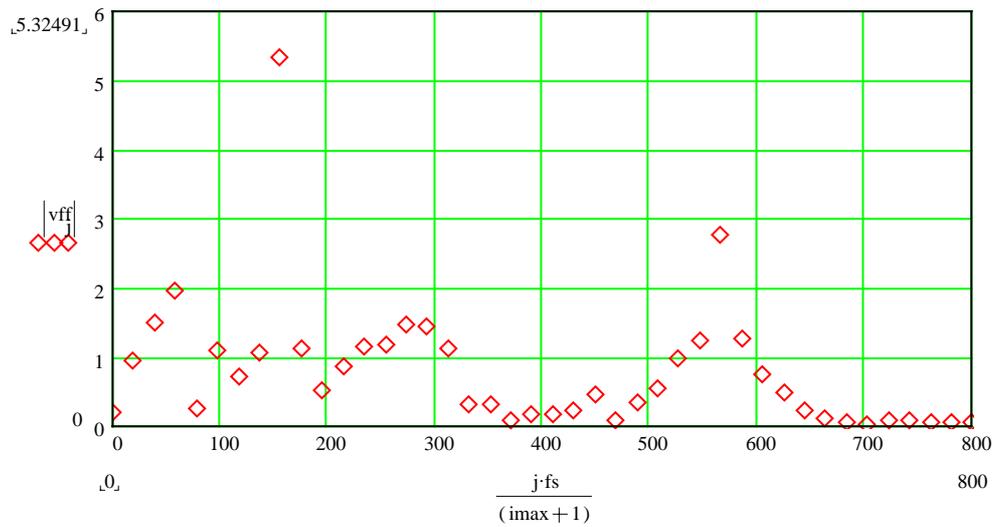


Abbildung 7 Spektrum der Impulsantwort, gemittelt über 50 ms.

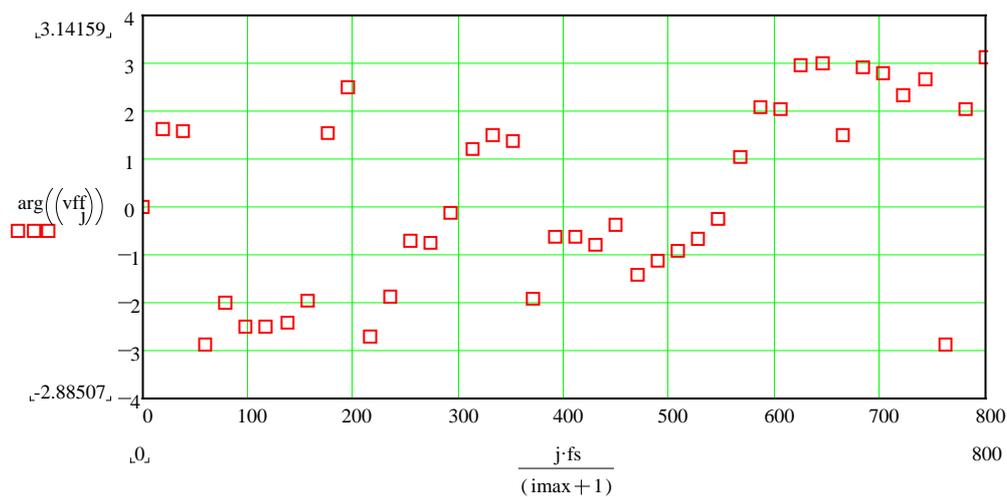


Abbildung 8 Phasen des Spektrums der Impulsantwort, gemittelt über 50 ms

Nach 6s (Abb. 9) hat sich eine 47Hz Grundwelle ausgebildet, die offensichtlich mit einer ca. 160 Hz Linie gekoppelt ist, wie die Schwebung (der schnelle Abschnitt um 6.3 s) zeigt.

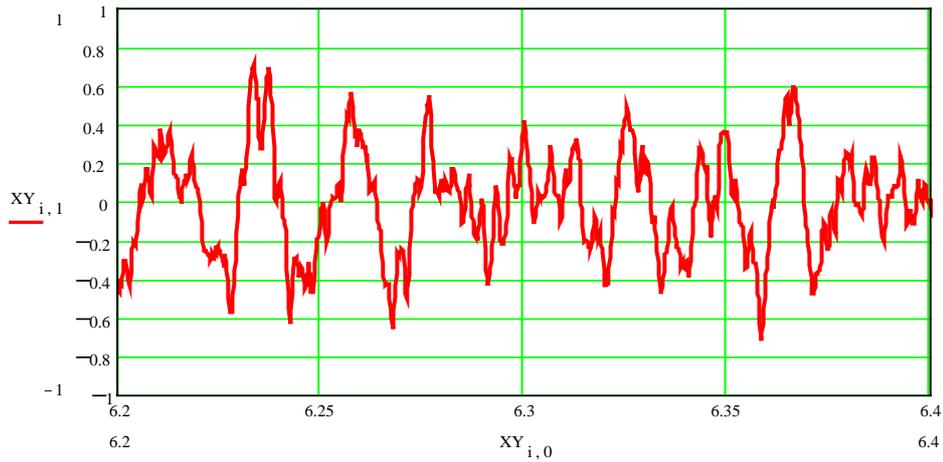


Abbildung 9 Impuls Antwort nach 6 Sekunden

Das Spektrum (10 und 11) ist über 6.5 s gemittelt.

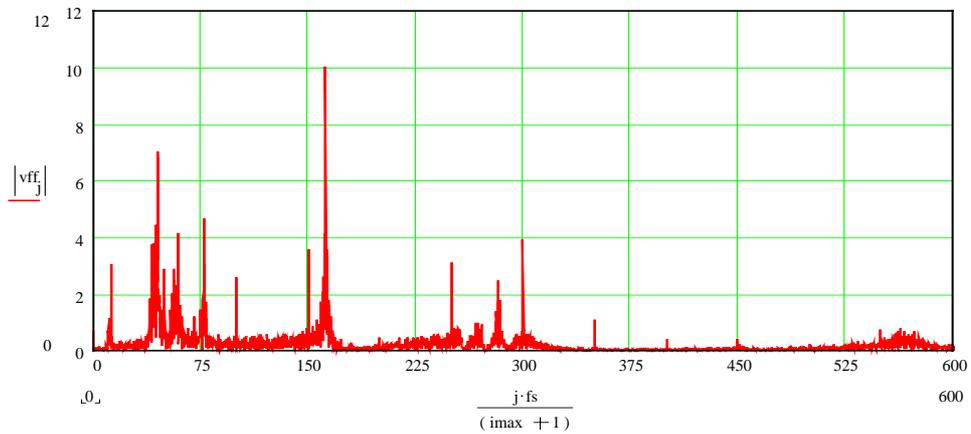


Abbildung 10 Spektrum der Impulsantwort, über 6.5 s gemittelt

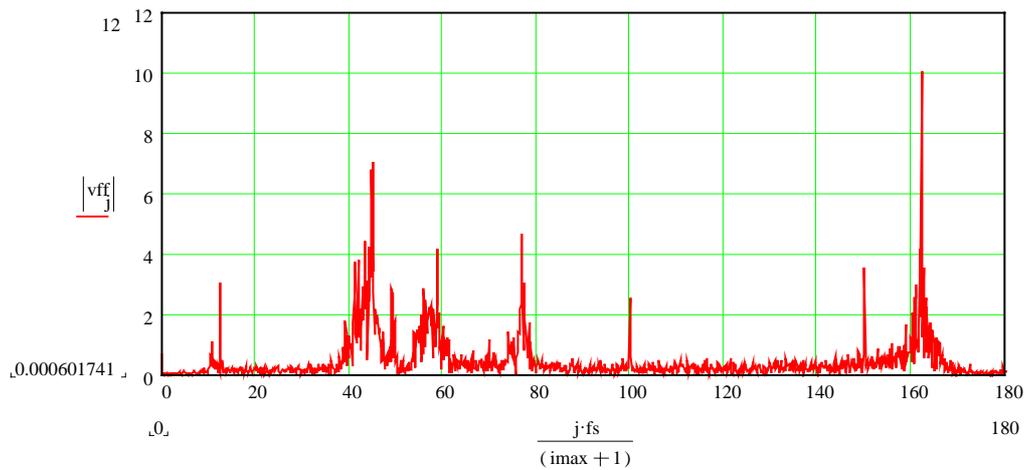


Abbildung 11 Spektrum der Impulsantwort, Ausschnitt, über 6.5 s gemittelt

Es zeigt, daß die Anfangsschwingung um 570 Hz fast ausgestorben ist. Dominant sind 163Hz und eine Dreiergruppe um 45-47Hz, 58Hz und 78Hz. Es gibt außerdem Energie in einer Dreiergruppe zwischen 250 und 300Hz sowie die Netzlinien 50, 100, 150, 300, 350Hz. Wichtiger als die 200 und 400Hz Komponenten ist die 12.5 Hz Linie, die von DESY2 verursacht wird. Die 78 Hz Resonanz ist auch am großen Phasensprung in der Abbildung 12 erkennbar.

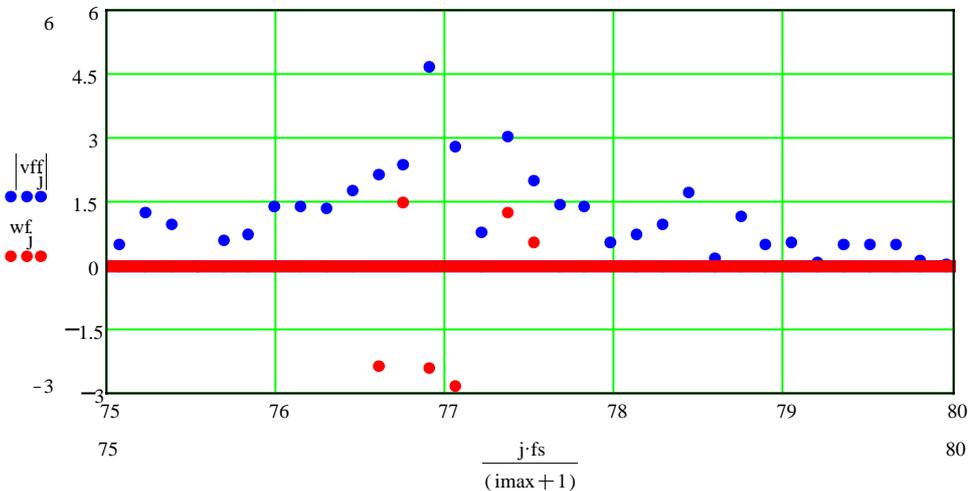


Abbildung 12 Amplitude(blau) und Phase (rot) der Impulsantwort, Ausschnitt um 78 Hz, Phase nur gezeigt, wenn Amplitude größer als 2.

Die blauen Punkte zeigen die Amplitude, die roten Punkte die Phase (falls die Amplitude groß genug ist). Der Phasensprung durch die Resonanz ist auch in Abb. 13 bei 162 Hz deutlich sichtbar.

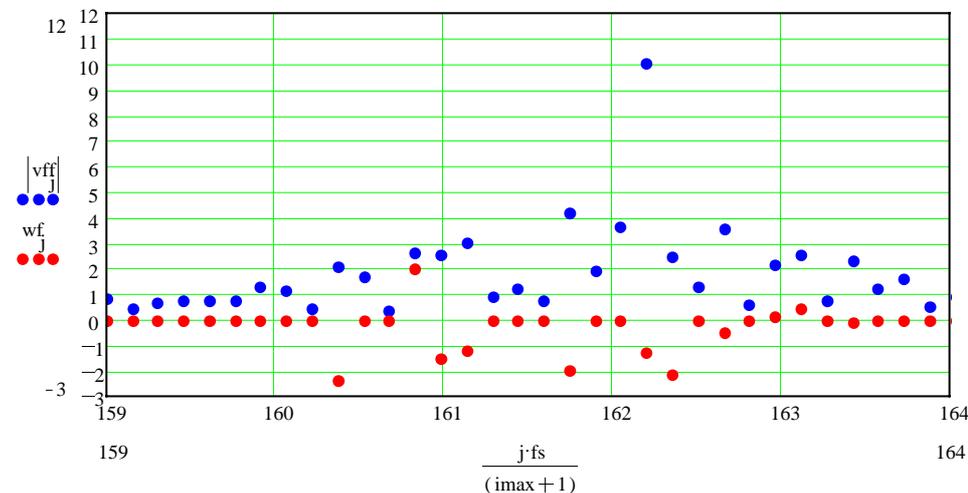


Abbildung 13 Amplitude(blau) und Phase (rot) der Impulsantwort, Ausschnitt um 162 Hz, Phase nur gezeigt, wenn Amplitude größer als 2.

Die Resonanzen sind sehr schmal und also von hoher Güte. Es wird dringend geraten, dieses Übel schnellstmöglich zu beseitigen.

Antwort der Regelstrecke auf eine sinusförmige Störung

Es ist nützlich die Abbildungen 10 bzw. 11 mit der Antwort des Strahl X auf eine sinusförmige Anregung zu vergleichen (Abb. 14). Bei dieser Methode wird die Antwort

auf eine sinusförmige Erregung phasenstarr und sehr schmalbandig mit dem Spektrumanalyser detektiert. Insbesondere werden andere, gleichzeitig auftretende, Frequenzen unterdrückt.

Antwort des Strahl X auf sinusförmige Erregung, April 98

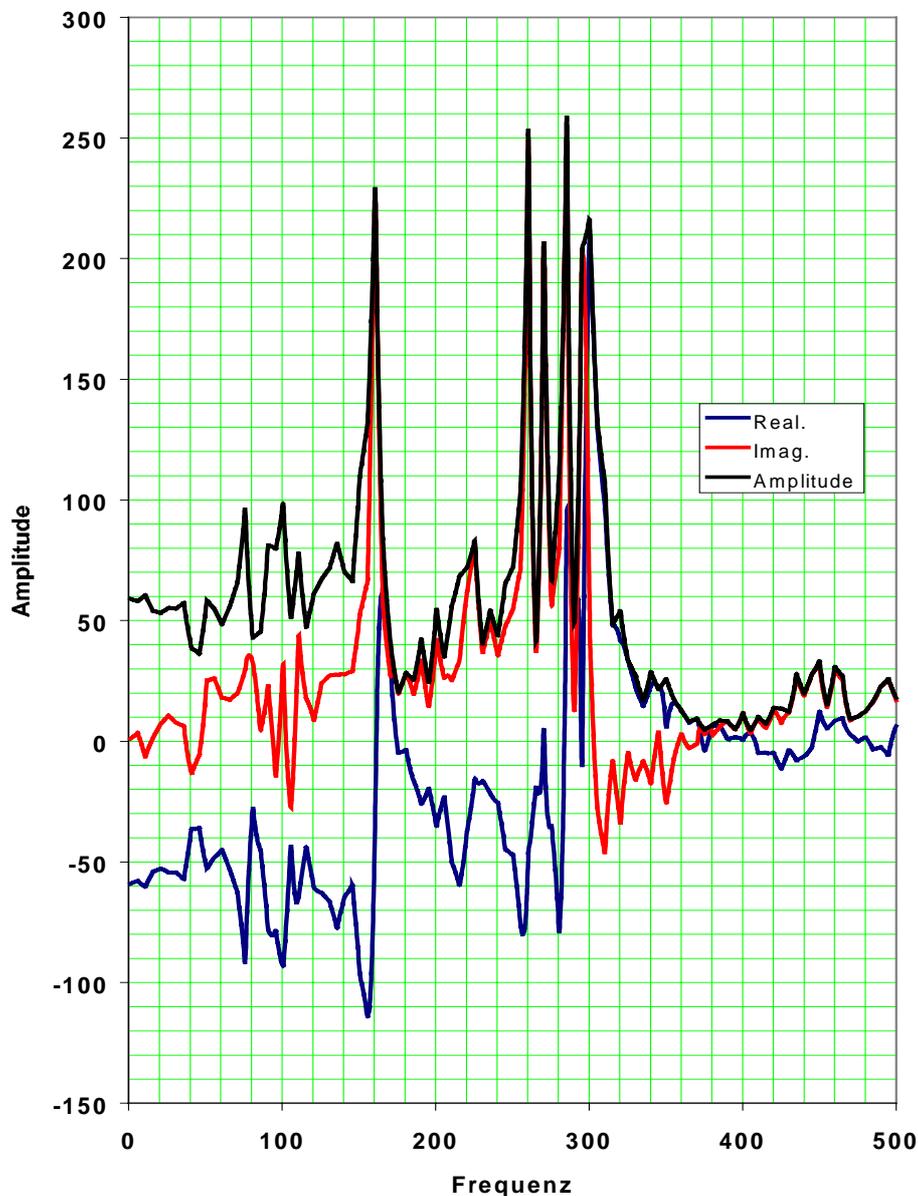


Abbildung 14 Antwort des Strahl X auf sinusförmige Anregung, schmalbandig mit dem Spektrumanalyser gemessen. Daten vom April 98.

Man sieht vier Linien bei 250 – 300 Hz und die sehr dominante 162 Hz Linie auch in der Abbildung 14. Das sind also eindeutig mechanische Anregungen durch den Piezo. Schon im letzten Jahr konnten L. Träger und K. H. Meß nachweisen, dass die 78Hz Linie eindeutig eine mechanische Resonanz des Goniometers am Strahl X ist. Sie wird anscheinend auch über die höherfrequenten Piezo Resonanzen gefüttert, wie die Schwebung in Abbildung 9 zeigt.

Die Aktivität bei 12,5, um 45 und 55 Hz in der Abbildung 11 fehlt bei der sinusförmigen Anregung. Es gibt dafür zwei mögliche Erklärungen. Entweder handelt es sich

um Aktivitäten des primären Strahls oder diese Frequenzen werden ausschließlich von höheren Frequenzen heruntergefüttert. Letzteres mag für die 55 Hz Unruhe möglich sein. Die ca. 40 Hz Schwingungen wurden auch an Strahl A1 im November 97 gefunden und waren Herrn Brefeld nicht unbekannt.

Spektrum des unregelten Strahls

Die Abbildungen 15, 16 und 17 zeigen das Frequenzspektrum des unregelten Strahls in verschiedenen Frequenzauflösungen.

6.4.98 X-Strahlspektrum, unregelt

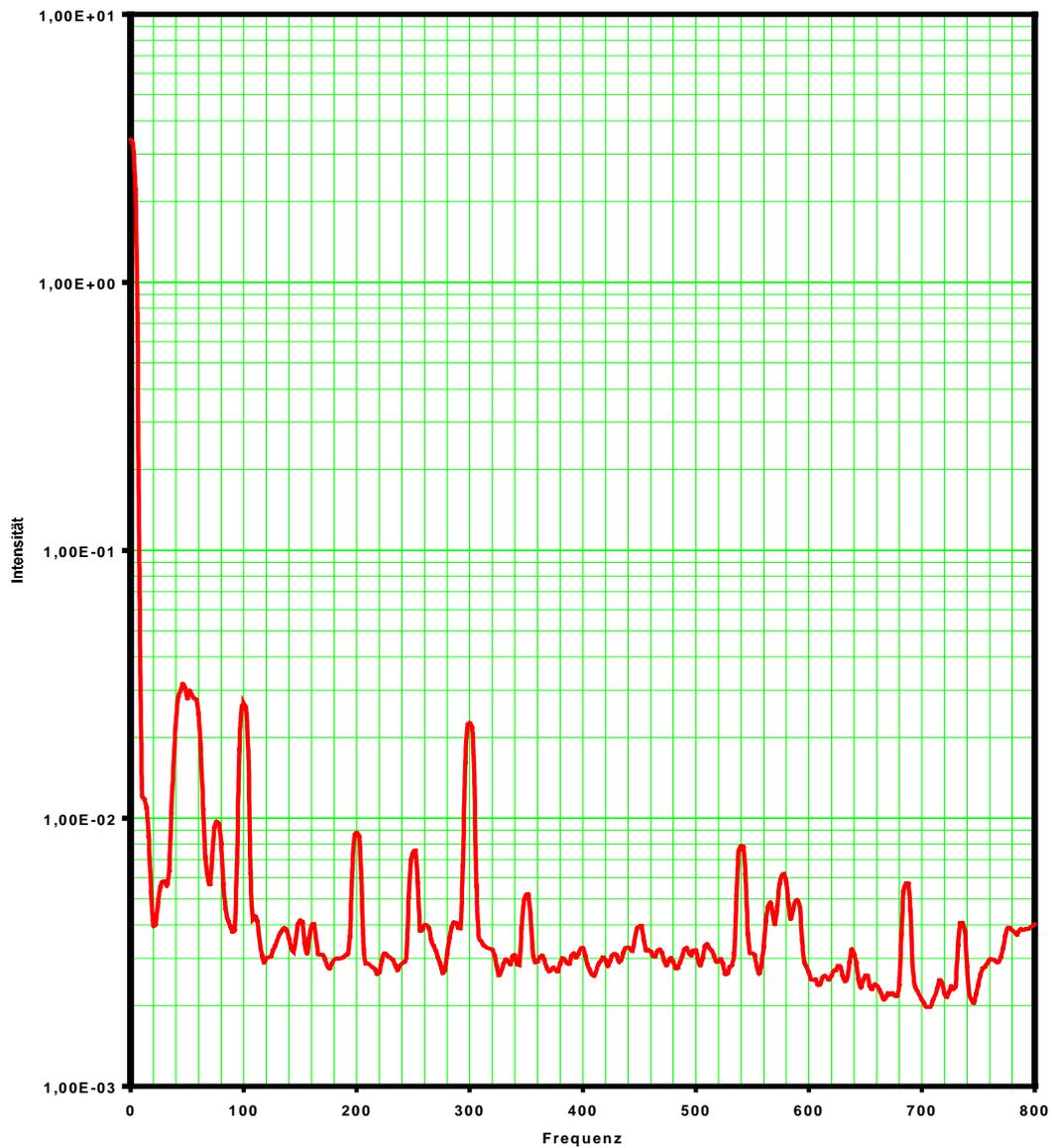


Abbildung 15 Spektrum des unregelten Strahls X (FFT, April 98)

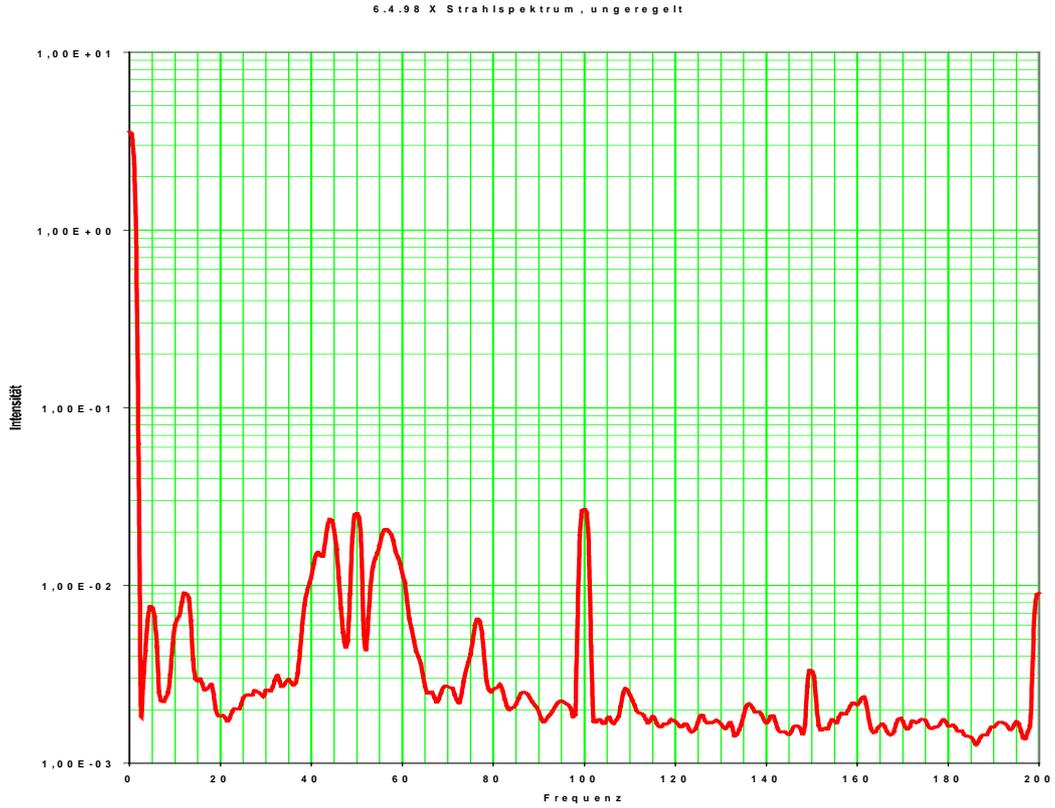


Abbildung 16 Spektrum des unregelten Strahls X (FFT, April 98,0...200Hz)

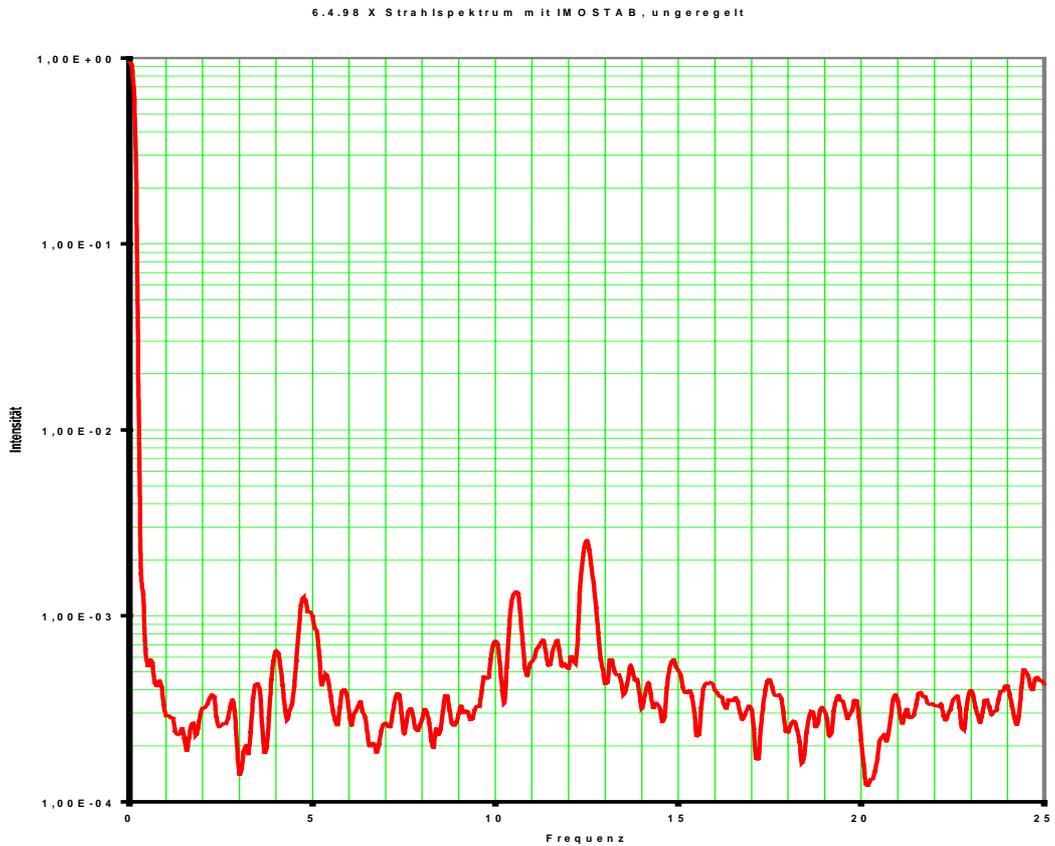


Abbildung 16 Spektrum des unregelten Strahls X (FFT, April 98,0...25Hz)

Nach der Diskussion über die mechanischen Schwingungen des Monochromators und des Goniometers ist klar, daß die Frequenzen oberhalb von 10 Hz mehr von akademischen Interesse sind, weil sie mit dem Stabilisator nicht zu bekämpfen sind. Ein Vergleich mit Abbildung 10, der Impulsantwort des Monochromators, zeigt, daß einige Monochromator Komponenten wohl permanent etwas wackeln. Namentlich zwischen 500 und 600 Hz. Auch die 250 Hz Linie taucht wieder auf. Die 163 Hz Linie ist hier nicht vertreten und das Goniometer wackelt auch nur moderat (75 Hz). Die Schwingungen zwischen 37 und 60 Hz sind wohl echte Strahlmodulationen. Die Resonanzen bei 5 und 10 Hz lassen an Regelschwingungen der DORIS Magentansteuerung denken. Unterhalb von 2 Hz steigt das Spektrum an. Dabei übertreibt der Spektrumanalyser nach Herstellerangaben. Der 0 Hz Offset füttert in die benachbarten Bins; sie dürfen nicht ernst genommen werden.

Impuls- und Sprungantwort der geschlossenen Regelstrecke

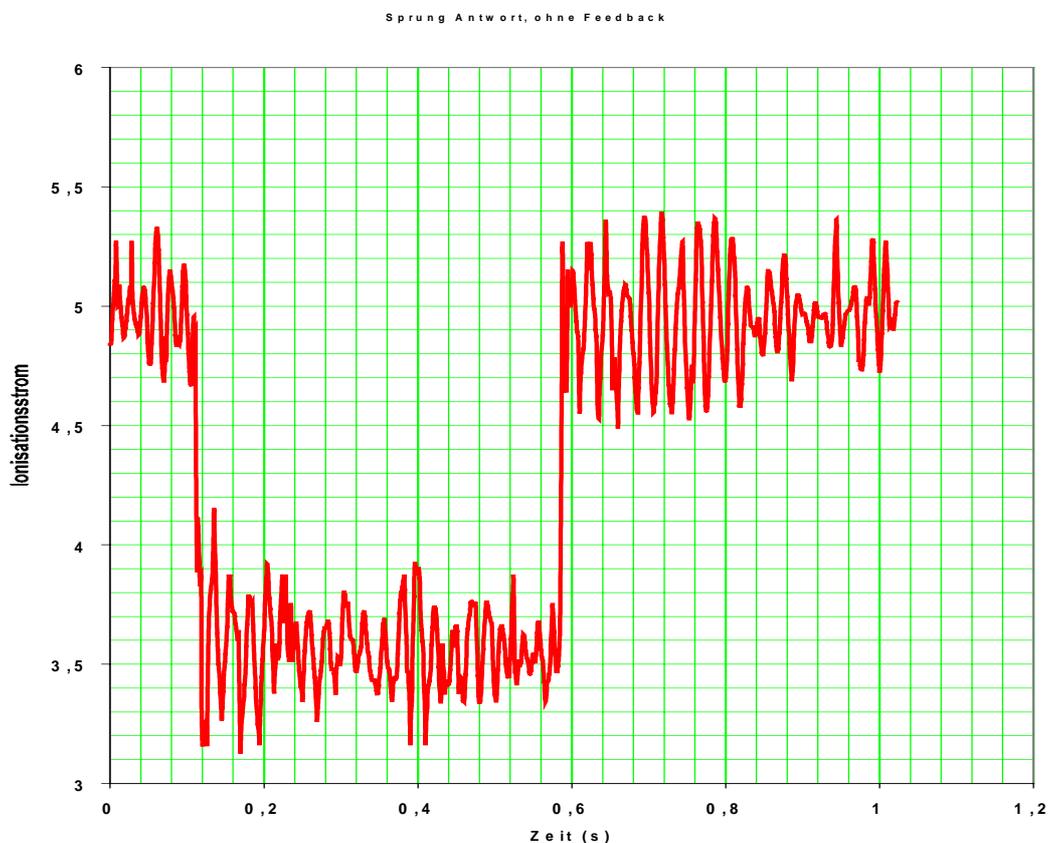


Abbildung 18 Sprungantwort, ohne Regelung

In Abbildung 18 ist die Antwort auf einen Störimpuls im unregelten Zustand sichtbar. Der Störimpuls verschiebt den Arbeitspunkt auf der Rockingkurve schlagartig. Die Intensität und die 40 Hz Modulation werden niedriger, beziehungsweise wieder größer. Abbildung 19 zeigt wie die Regelung des MOSTABs (rote Kurve) nach der impulsförmigen Störung (ca. 0.59 im vorigen Bild) den Sollwert wieder erreicht. Zum Vergleich ist die Antwort des D-MOSTABs (blaue Kurve) bei einer typischen Reglereinstellung dargestellt. Offensichtlich sind die eingestellten Sollwerte nicht ganz identisch. Auffälliger ist jedoch die 43 Hz Schwingung, die nicht von den Reglern stammt. Es handelt sich, wie oben dargestellt, um Intensitätsschwankungen des einfallenden Strahls. Sie lassen sich, wegen der Nähe zu den mechanischen Resonanzen

nicht ausregeln. Es wäre darüber hinaus schädlich, die Intensität unter diesen Umständen konstant halten zu wollen, weil man dann die spektrale Reinheit entsprechend modulieren würde. Man darf feststellen, daß der D-MOSTAB etwa doppelt so schnell den Sollwert wieder erreicht wie der MOSTAB.

Vergleich der Sprungantworten von MOSTAB und
DMOSTAB

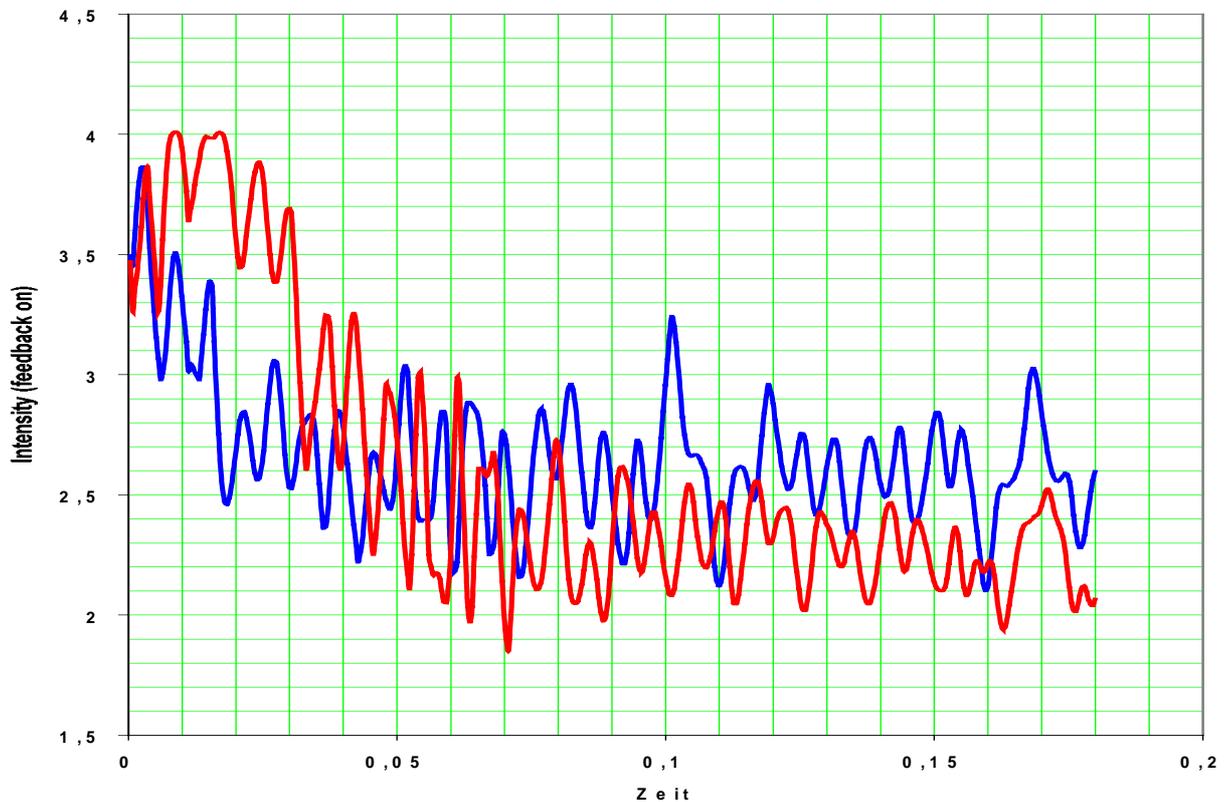


Abbildung 19 Sprungantwort der MOSTAB und D-MOSTAB Regelungen

Vergleich der Wirkung der Regler auf sinusförmige und natürliche Anregung

Die Abbildung 20 zeigt das Regelverhalten des MOSTAB (rote Kurve) und des D-MOSTAB mit typischen Regelparmetern (PID) mit zwei überlagerten Tiefpässen von 75 bzw. 150Hz bei einer sinusförmigen Anregung.

Es wird nochmals darauf hingewiesen, daß diese Meßmethode unempfindlich ist gegen Frequenzen abseits von der gerade angeregten. Wie zu erwarten liegen die beiden D-MOSTAB (blaue) Kurven bis 15 Hz nahe beieinander. Die tiefer gefilterte Variante hat Schwierigkeiten oberhalb etwa 40 Hz. Die MOSTAB Regelung setzt bei tieferen Frequenzen ein und ist bei 1 Hz etwa 6dB schwächer. Bei höheren Frequenzen zeigen sich in allen Fällen Probleme bei der 75Hz Resonanz (und zweifellos auch bei den höheren Resonanzen, die hier nicht gemessen wurden). Die etwas größere Bandbreite der D-MOSTAB Regelung erklärt natürlich auch das schnellere Ausregeln der Sprungfunktion.

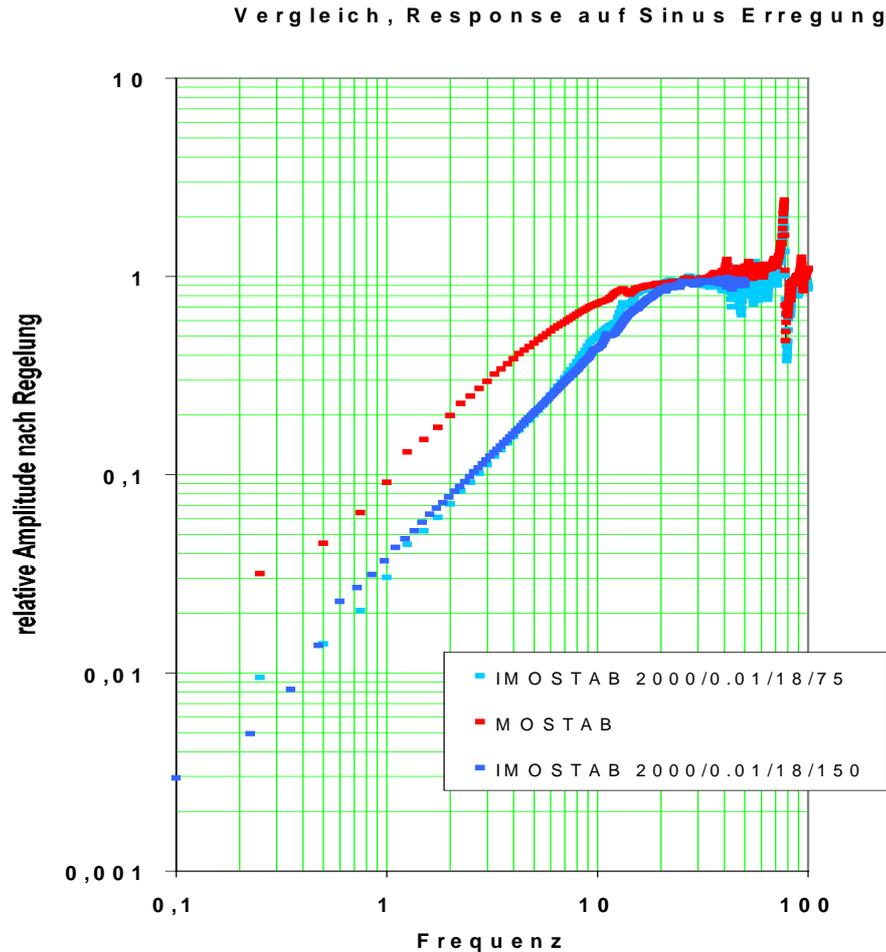


Abbildung 20 Antwort des geregelten Systems auf eine sinusförmige Anregung. Die Messungen am D-MOSTAB (blaue Kurven) unterscheiden sich durch das Tiefpaßfilter (75 bzw. 150 Hz).

Die eigentliche Frage ist nun nicht, wie reagieren die Systeme auf künstliche, streng periodische Störungen, sondern was passiert in der rauhen Wirklichkeit. Abbildung 21 zeigt das Strahlspektrum mit MOSTAB (rote Kurve) und D-MOSTAB (blaue Kurve). Das Spektrum ist auf eine Peakhöhe von 1 bei einem Sollwert von 0.6 normiert. Der Plot zeigt also den rms Wert von Schwingungen, aus denen sich das Strahlsignal zusammensetzt. Wenn z.B. der Peakwert auf 5V eingestellt wird und der Sollwert 60%=3V beträgt, so läßt sich eine $5 \cdot 0.0025V$ 12.5 Hz Schwingung feststellen. Das Signal enthält jedoch einen wesentlich größeren Anteil von Schwingungen um 40 Hz (und bei höheren Frequenzen). Die Unterschiede zwischen der alten Lösung und der neuen sind, wie zu erwarten, gering, weil im Wesentlichen der gleiche Algorithmus benutzt wird. Unterhalb von 12 Hz regelt der D-MOSTAB etwa zweimal genauer und erreicht unterhalb von 2Hz etwa 20ppm. Das wird mit größerem Rauschen zwischen 20 und 40 Hz erkauft. Der 45 Hz Berg wird von beiden Regelungen nicht angetastet. Im unregulierten Zustand (Abbildung 18) haben diese Schwingungen eine Amplitude von 16% (Peak to Peak). Der Abbildung 21 entnehmen wir eine mittlere, relative Amplitude (rms) von etwa 0.003 für etwa 60% der Frequenzen im Bereich 38 bis 65 Hz. Daraus errechnen sich 14%, in ausgezeichnete Übereinstimmung mit Abbildung 18.

Vergleich der Regelungen bei 23keV, 2000/0.01/18/150

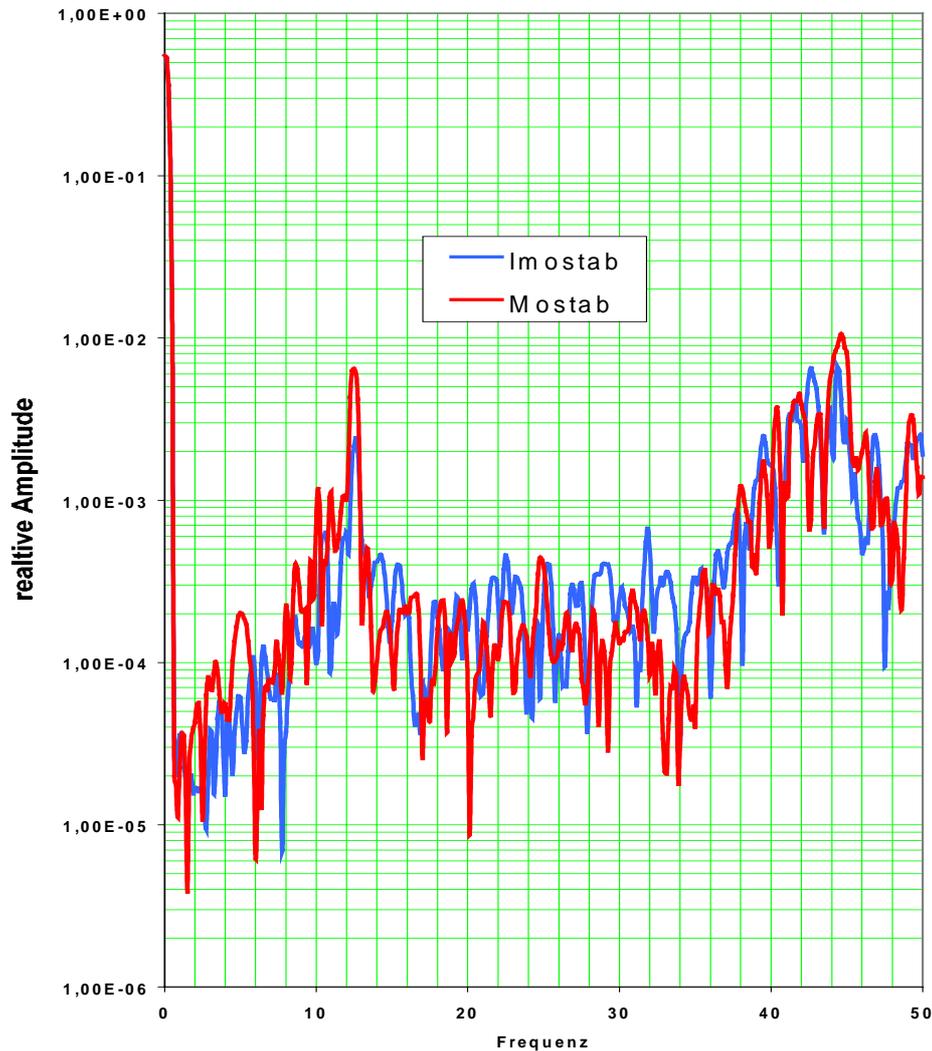


Abbildung 21 Vergleich der Regelungen bei 23 keV

Sonstige Unterschiede, Zusammenfassung

Der MOSTAB ist nahezu optimal an die bedauerlich schlechten Bedingungen angepaßt. Daher kann der D-MOSTAB kaum bessere Regelergebnisse zeigen. Dies gilt generell für jedes System, solange der Strahl von sich aus unruhig ist und solange die Mechanik zum Schwingen neigt. Beide Systeme, MOSTAB und D-MOSTAB, sind am unteren Frequenzende an der Rauschgrenze und beide sind nicht in der Lage die Strahlschwankungen zu kompensieren. Wünscht man spektrale Reinheit, muß unbedingt an der Stabilisierung des primären Strahls gearbeitet werden.

Der alte MOSTAB verfügt über eine einfache Bedienung, die anscheinend gut beherrscht wird und kaum Regelkenntnisse voraussetzt.

Der D-MOSTAB verfügt über eine RS232 Schnittstelle, die im Augenblick noch vom DSP kontrolliert wird. Später wird zusätzlich ein feldbusfähiger Mikro eingebaut, der den DSP von der Kommunikation entlastet. Dann wird auch das Bedienerinterface auf der Frontplatte aktiv werden können. Zur Zeit ist ein VT220 Terminal, von denen es noch einige gibt, erforderlich.

Im Gegensatz zum MOSTAB ist der D-MOSTAB nicht auf einen Algorithmus und einen Satz von Regelparametern festgelegt. Jede Beamline, d.h. der zugehörige Computer, kann die optimalen Parameter und, eventuell, optimalen Algorithmen kennen und downloaden. Dynamische Steuerung ist möglich.

Zusammenfassend kann gesagt werden:

- Der D-MOSTAB kann alles, was der MOSTAB kann.
- Er regelt unterhalb 12 Hz marginal besser.
- Er rauscht oberhalb 20Hz etwas mehr.
- Er kann dynamisch oder quasistatisch veränderten Bedingungen angepaßt werden.
- Er liefert ein Signal, wenn die Regelung nicht ausreichend stabil ist.
- Er ist (vermutlich) etwas teurer.
- In der Übergangsphase wird er umständlicher zu bedienen sein, weil es mehr freie Parameter gibt.

Der Wunsch, mit Hilfe eines Lock-In Verfahrens zu einer SollwertEinstellung zu gelangen, die unabhängig von der augenblicklichen Peakhöhe und damit der Energie ist, läßt sich nur verwirklichen, wenn ein hinreichend ruhiges Frequenzband gefunden werden kann, in das man die Modulationsfrequenz legen kann, ohne andere Resonanzen anzuregen. Das ist weder am Strahl X, an dem diese Untersuchungen stattfanden, noch am Strahl A1 möglich. Voraussetzung wären die Bekämpfung der Primärstrahlschwankungen und der mechanischen Resonanzen.

Stand

Es gibt nur wenige MOSTABs als Reserve. Ihr Nachbau wäre zur Zeit noch möglich (Alter der Bauteile!). Ein moderater Neudesign würde unveränderte Funktionalität bei etwas niedrigeren Kosten mit heute üblichen Bauteilen ermöglichen.

Den D-MOSTAB gibt es als Prototyp (mit eingeschränkter Bedienfähigkeit). Ein zweiter Prototyp befindet sich im Bau. Es fehlen einige Bauteile, die aber zur Bedienung dienen und daher ohnehin noch nicht gebraucht werden. FEB hat mindestens VT220 Terminals, die ausgeliehen werden können, bis das endgültige Interface existiert. FEB ist dringend an einer Dauererprobung ohne übermächtigen Erfolgswang interessiert, um das System den Bedürfnissen anpassen zu können.