

Wirbelstromprüfung mit wegbasierten Filter: Prüfen bis zum Stillstand

Aschwin GOPALAN¹, Stephan LENTZ¹
¹ Rohmann GmbH, Frankenthal

Kontakt E-Mail: gopalan@rohmann.de

Kurzfassung. Die passende Einstellung der Filter in Bezug auf Fehlergröße, Sensorwirkbreite und Oberflächengeschwindigkeit ist entscheidend für eine erfolgreiche Wirbelstromprüfung. Oft kann jedoch keine konstante Oberflächengeschwindigkeit hergestellt werden. Hier kamen in der Vergangenheit Filternachführungen zum Einsatz - die Zeitkonstanten wurden automatisch der ermittelten Materialgeschwindigkeit angepasst. Diese Methode stößt an ihre Grenzen, wenn die Geschwindigkeit zu klein wird, so dass insbesondere die Hochpassfilter nicht mehr stabil zu realisieren sind. Spätestens beim Materialstillstand versagt die Technik vollständig.

In den digitalen Wirbelstromprüfgeräten von Rohmann der neuen Generation wird statt der Filternachführung ein wegbasierter Filtermodus angeboten. Hier werden die Filter nicht wie üblich in der Zeitdomäne berechnet, sondern basierend auf der von der Anlage gelieferten Weginformation. Dies führt dazu, dass die Filter unabhängig von der Materialgeschwindigkeit bis zum Stillstand und ohne Artefakte durch abgestufte Filter funktionieren. Selbst wenn bei einer dynamischen Prüfung auf dem Fehler angehalten und später weitergeprüft wird, wird der Fehler vollständig bewertet. Dies ermöglicht neue Einsatzgebiete, speziell bei getakteten Prüfungen an Langprodukten. Auch sind bei Prüfungen an rotierenden Teilen signifikante Taktzeitreduzierungen möglich, da nicht auf das Erreichen einer Nenndrehzahl gewartet werden muss, sondern sofort aus dem Stillstand heraus geprüft werden kann. Die theoretischen Hintergründe dieser neuen Technologie werden erläutert und Beispiele aus der Praxis gezeigt.

Einführung

Bei der dynamischen Wirbelstromprüfung kommt der richtigen Einstellung des Hochpassfilters große Bedeutung zu. Der korrekte Wert hängt ab von der erwarteten Fehlergröße, der Wirkbreite des Sensors und der Oberflächengeschwindigkeit. In vielen Prüfsituationen kann jedoch nicht sichergestellt werden, dass die Oberflächengeschwindigkeit konstant ist. Insbesondere bei der produktionsbegleitenden Prüfung wird die Vorschubgeschwindigkeit oft durch andere Prozessschritte diktiert, wie z.B. einer Längsnahtschweißung oder einer Sägevorrichtung. Um dieses Problem zu lösen, werden seit langem Möglichkeiten zur Filternachführung in Prüfgeräte integriert. Hier wird die Zeitkonstante der Filter durch extern zugeführte Echtzeit-Geschwindigkeitsinformation verändert. In der Regel können die Filter jedoch nur in einem eingeschränkten Bereich nachgeführt werden, vor allem hin zu sehr langsamen Geschwindigkeiten werden hier schnell technologische Grenzen erreicht. Analoge Filter mit sehr großen Zeitkonstanten benötigen



große Kapazitäten, die sich nicht im laufenden Betrieb störungsfrei zuschalten lassen. Digitale Filter werden meistens als IIR Filter realisiert, hier setzt die numerische Genauigkeit der Berechnung Grenzen zu sehr kleinen Frequenzen und die Filter würden instabil werden. Die hier vorgestellte Methode vermeidet diese Probleme, indem die effektive vom digitalen Filter verwendete Abtastrate mit der Geschwindigkeit moduliert wird, statt wie üblich die Koeffizienten der Filter und damit die Filterantwort in der Zeit.

1. Filter in der Wirbelstromprüfung

In Wirbelstromprüfgeräten werden im Signalweg der demodulierten (NF-) Signale Signalfilter eingesetzt. Diese dienen der Unterdrückung von unerwünschten Signalanteilen. Im Normalfall werden beide Signalkomponenten (X und Y) gleichartig gefiltert, und zwar immer mit einem einstellbaren Tiefpassfilter. Die Aufgabe dieses Filters ist es, hochfrequente Störungen zu eliminieren. Diese können einerseits ihren Ursprung in der Prüfelektronik selbst haben (Verstärkerrauschen, Widerstandsrauschen im Sensor) haben, andererseits aber auch von der Oberflächenbeschaffenheit des Prüflings herrühren. Die elektronischen Anteile der Störungen manifestieren sich in der Regel als (mehr oder weniger weisses) Rauschen mit einem konstanten Spektrum. Das Spektrum der oberflächenabhängigen Störungen jedoch ist abhängig von der Materialtransportgeschwindigkeit. In der Regel ist diese Abhängigkeit jedoch nicht problematisch.

Außerdem kommen in der Wirbelstromprüfung oft Hochpassfilter zum Einsatz. Diese unterdrücken niederfrequente Störungen wie sie z.B. durch langsame Positions- oder Füllfaktoränderungen hervorgerufen werden. Wenn ein Hochpassfilter zum Einsatz kommt entfällt außerdem das sonst notwendige Abgleichen des Signals auf gutem Material. Die hier einzustellende Frequenz hängt kritisch von der Vorschubgeschwindigkeit ab. Ist der Filter im Vergleich zum Vorschub zu schnell eingestellt, werden Fehlersignale unterdrückt und die Prüfung versagt. Hochpassfilter werden oft eingesetzt für rotatorische Prüfungen. Hier hängt die Oberflächengeschwindigkeit von der Drehzahl der Rotiereinheit ab, die im Betrieb konstant gehalten werden kann. Eine Filternachführung ist hier nicht erforderlich. Anders ist die Situation, wenn z.B. Langprodukte mit umfassenden Spulen geprüft werden. Hier ist die Oberflächengeschwindigkeit direkt mit dem Materialtransport gekoppelt. Schwankt die Transportgeschwindigkeit oder wird der Transport komplett angehalten (z.B. um mit einer stationären Säge zu sägen), dann passt die eingestellte Hochpass-Filterfrequenz nicht mehr. Im Extremfall würde das Material genau dann angehalten, wenn ein Fehler im Wirkungsbereich der Prüfspule wäre. Dieser könnte ohne die hier beschriebene wegbasierte Filterung nicht detektiert werden.

2. Digitale Filter

2.1 Allgemeines

Während in den Anfangsjahren der Wirbelstromprüfung die gesamte Signalverarbeitung in analogen Schaltungen erfolgte, kommen heute meistens Digitale Signalprozessoren (DSP) oder Feldprogrammierbare Gate Arrays (FPGA) zum Einsatz. Je nach Gerät erfolgt die Analog-Digital-Wandlung der Eingangssignale nach einer analogen Demodulationsstufe oder direkt im HF-Zweig mit nachgeschalteter digitaler Demodulation. In beiden Fällen liegt das demodulierte (NF) Signal digital vor und es kommen digitale Filter in der weiteren Verarbeitung zum Einsatz. Unterschieden werden muss hier einerseits zwischen der Charakteristik der eingesetzten Filter (Hochpass, Tiefpass, Frequenzgang/Typ) und der

Implementierung. Im wesentlichen werden zwei Verschiedene Architekturen für digitale Filter unterschieden: Filter mit endlicher Impulsantwort (Finite Impulse Response, FIR) und Filter mit unendlicher Impulsantwort (Infinite Impulse Response, IIR).

2.2 Zusammenhang zwischen Filterfrequenz und Abtastrate

Normalerweise wird die gesamte digitale Verarbeitungskette eines Wirbelstromgerätes mit einer konstanten Abtastrate f betrieben, die mehr als das Doppelte der höchsten vorkommenden Frequenz betragen muss (Nyquist-Kriterium). Die Grenzfrequenz eines digitalen Filters wird normiert auf die Samplerate angegeben. Wenn z.B. die Samplerate 250 kps/s (250 000 Datenpunkte pro Sekunde) beträgt und die gewünschte Filterfrequenz 25 kHz werden die Koeffizienten der Filter so berechnet, dass ihre -3 dB Frequenz bei $f/10$ liegt. Soll die Frequenz geändert werden, müssen neue Koeffizienten berechnet und verwendet werden. Je nach Architektur können diese jedoch nicht einfach im laufenden Betrieb verändert werden, ohne eine ungewollte Sprungantwort der Filter zu bewirken. Für eine störungsfreie Frequenzanpassung werden daher komplexe Schemata angewendet, bei denen z.B. ein zweiter Filter mit der neuen Frequenz parallel die selben Eingangsdaten verarbeitet. Nach dessen Einschwingzeit wird langsam vom „alten“ zum „neuen“ Filter überblendet. Daher kann eine Änderung der Filterfrequenz auch nicht innerhalb weniger Sampletakete erfolgen.

2.3 IIR Biquads

Die am häufigsten anzutreffende Architektur für digitale Filter ist die von einer oder mehreren hintereinandergeschalteten IIR-Biquad Stufen. Es handelt sich hierbei um IIR Filter zweiter Ordnung, die zwei Pole und zwei Nullstellen enthalten. Kritisch ist hierbei, dass numerische Ungenauigkeiten (Roundoff-Error) insbesondere bei Grenzfrequenzen, die sehr viel kleiner sind als die Abtastrate, zu instabilem Verhalten führen können und der Filter beginnt zu schwingen. Da speziell für die Hochpass-Filter oft sehr niedrige Frequenzen (bis hinunter zu wenigen Hz) verwendet werden, ist hier wenig Spielraum gegeben, um die Filterfrequenz bei Verlangsamung des Materials weiter Abzusenken. Im Stillstand müsste die Filterfrequenz auf 0 Hz abgesenkt werden, was in dieser Architektur nicht möglich ist.

2.4 Multirate Systeme

In der digitalen Signalverarbeitung bezeichnet man mit einem Multirate System eine Signalverarbeitungskette, die nicht in allen Stufen der Verarbeitung mit derselben Abtastrate arbeitet. Zwischen den Stufen, die mit verschiedenen Abtastraten arbeiten, muss eine Raten-Konvertierung mit geeigneten interpolierenden Filtern stattfinden. Wenn die Signalverarbeitungskette eines Wirbelstromgerätes als Multirate-System realisiert ist, können die Filter mit einer von der Systemabtastrate abweichenden (kleineren) Abtastrate betrieben werden.

3. Wegbasierte Filterung

3.1 Wegbasierte Filterung im ELOTEST PL600

Im Elotest PL600 der Rohmann GmbH ist die Signalverarbeitungskette als Multirate-System ausgelegt. Sowohl die digitale Demodulationsstufe als auch die Filter können mit einer von der Systemabtastrate von 250 kps/s abweichenden Abtastrate betrieben werden. Wenn nun die Filter, statt mit einer konstanten Abtastrate mit einer von der Geschwindigkeit des Werkstückes abhängigen Abtastrate betrieben werden, verändert sich deren Grenzfrequenz bezogen auf die Zeit proportional zur Oberflächengeschwindigkeit, ohne dass die Filterkoeffizienten angepasst werden müssen. Dies funktioniert auch für sehr langsame Geschwindigkeiten, da auch hier die Stabilitätskriterien für die IIR-Filter unverändert eingehalten werden. Wie in Abschnitt 2 erwähnt arbeitet ein digitaler Filter nämlich nicht in der Zeitdomäne, sondern seine Grenzfrequenz ist definiert als Bruchteil der Abtastrate. Im Falle des Materialstillstandes wird der Filter „eingefroren“, da er keine Daten mehr erhält. Beim Wiederauffahren arbeitet er einfach weiter. Solange der Stillstand so kurz ist, dass keine nennenswerte Signaldrift erfolgt, ergibt sich hieraus auch keine Sprungantwort des Filters und somit keine Störung des Signals.

3.2 Anforderungen an den Wegtakt

Um mit einem wegbasierten Filter arbeiten zu können, ist es notwendig einen hochauflösenden Wegtakt zu erhalten, d.h. es wird ein Taktsignal benötigt, dessen Frequenz direkt von der Oberflächengeschwindigkeit abhängt. Um keine Signalqualitätsverluste zu bewirken, sollte der Wegtakt bei der maximalen Geschwindigkeit unterhalb, aber in der Nähe der maximalen Abtastrate (hier 250 kps/s) liegen. Einfach lässt sich ein solcher Wegtakt z.B. durch optische Quadratur-Encoder erzeugen, die über ein Rollrad mit der Werkstückoberfläche gekoppelt sind. Auch laserbasierte Wegmesssysteme sind einsetzbar. Falls sich die erforderliche hohe Zahl von Taktimpulsen so nicht erreichen lässt, gibt es im ELOTEST PL600 die Möglichkeit, mit Hilfe eines „digitalen Schwungrades“ eine Taktvervielfachung zu erzielen. Einziger Nachteil ist hier, dass es zu einem kurzen Nachlaufen des Schwungrades im Stillstand kommen kann, die Dynamik der Geschwindigkeitsausregelung wird hiervon etwas schlechter. In der Praxis sind Taktvervielfachungen bis etwa zu einem Faktor von 10 unproblematisch. Je nach Prüfaufgabe ergibt sich hieraus eine geforderte Wegauflösung der Wegmessung von etwa 1 Taktimpuls pro mm. Dies ist mit z.B. mit hochauflösenden Encodern problemlos zu erreichen.

3.3 Bedienkonzept im ELOTEST PL600

Strenggenommen kann die Grenzfrequenz eines so arbeitenden Filters nicht wie gewohnt in Hz, also 1/s angegeben werden. Da der Filter nicht in der Zeitdomäne sondern im Ortsraum arbeitet ergeben sich Filterkennwerte in z.B. 1/mm. Dies ist für den Bediener ungewohnt und es hat sich gezeigt, dass in der Praxis ein solcher Filter schwer einzustellen ist. Daher wurde das Bedienkonzept beim ELOTEST PL600 dahingehend überarbeitet, dass der Filter bei einer möglichst konstanten Oberflächengeschwindigkeit in der Nähe der Maximalgeschwindigkeit wie gewohnt in der Zeitdomäne eingestellt wird. Gleichzeitig misst das Gerät laufend die Frequenz des Wegtaktes. Wenn dann in den „Lock“-Modus zur

weggetakteten Filterung umgeschaltet wird, berechnet das Gerät aus der aktuellen Geschwindigkeit die entsprechenden Filterkoeffizienten für den weggetakteten Filter.

5. Anwendungsbeispiele

5.1 Prüfung von Endlosprodukten mit Umfassender Spule

In der vorliegenden Anwendung wird ein endlos gefertigtes, längsnaht-geschweißtes Rohr nach der Schweißstation auf Bindefehler und Poren geprüft. Zum Einsatz kommt eine umfassende Differenz-Spule zur Erkennung der Poren und eine umfassende Absolutspule zur Schlitzrohrerkennung. Die Absolutspule wird statisch, d.h. ohne Hochpassfilter betrieben. Die Differenzspule wird jedoch mit einem Hochpassfilter betrieben. Alle Filter werden in dieser Anwendung wegbasiert betrieben, ein Lasermesssystem der Fa. Polytec (LSV 1000) liefert die Wegimpulse mit einer Auflösung von 0.1 mm. Die Prüfung ist in eine Ablänganlage integriert, die den Materialtransport zum Trennen der Rohrabschnitte stoppt. Eine 100% Prüfung der fertigen Abschnitte kann so gewährleistet werden.

5.2 Hochgeschwindigkeitsprüfung von Schraubenköpfen

Bei der Rissprüfung an Schraubenköpfen in Schraubenprüfautomaten mit Rundtakttisch wird in der Regel an einer Prüfpostion die Schraube in Rotation Versetzt und mit einer oder mehreren feststehenden Sonden der Schraubenkopf auf Risse geprüft. Hierzu muss die Schraube normalerweise mit konstanter Drehzahl geprüft werden, um keine Fehlmessungen durch Filter-Fehlanpassungen zu erhalten. Mit Hilfe der weggetakteten Filterung kann die Schraube mit einer Drehzahlrampe ohne konstanten Bereich geprüft werden, es reichen nur wenige Umdrehungen und die Taktzeit kann so deutlich verkürzt werden.