

Einfluss der Ansteuerung auf Magnetvibrationsförderer

The influence of controllers on magnetic vibratory conveyors

Niels Dallinger
Thomas Risch

Professur Fördertechnik
Institut für Fördertechnik und Kunststoffe
Technische Universität Chemnitz

Anhand von theoretischen und experimentellen Versuchen wird demonstriert, welchen Einfluss Ansteuergeräte auf die Güte eines Vibrationsförderers ausüben können. Es werden Strom- und Spannungsverläufe von verschiedenen Steuergeräten in Zusammenhang mit den resultierenden Erregerkraftverläufen der angeschlossenen Elektromagnete betrachtet. Die Kraftverläufe werden hinsichtlich ihres Anregungspotenziales bezogen auf Eigenschwingformen am Förderer bewertet.

[Schlüsselwörter: Vibrationsförderer, Elektromagnet, Magnetkraft, Schwingmagnet]

The influence control units can have, on the quality of the conveying process of vibratory conveyors, is demonstrated in theoretical and experimental tests. There are considered current and voltage characteristics of various control units in conjunction with the resultant force characteristics of the connected electromagnets. The force characteristics are evaluated based on respect to the incitation of natural deflection shapes of the conveyors.

[Keywords: vibratory conveyors, vibratory controllers, oscillating magnets, magnetic force,]

1 EINLEITUNG

Vibrationsförderer werden branchenübergreifend sowohl zur Schütt- als auch zur Stückgutförderung eingesetzt. Neben der eigentlichen Gutförderung können unter anderem gleichzeitig Sortier-, Positionier- und Zuführaufgaben bewältigt werden. Das Laufverhalten bzw. die Laufruhe des Fördergutes ist dabei ebenso entscheidend wie die erreichbare Fördergeschwindigkeit.

Gerade im Bereich der Zuführ- und Montagetechnik sind die Vibrationsförderer und speziell deren Förderorgane fast immer auf ein bestimmtes Fördergut abgestimmt. Bei der Erstinbetriebnahme treten häufig Probleme wie unruhiges Gutverhalten, ungleichmäßige Fördergeschwindigkeiten oder gar unterschiedliche Förderrichtungen auf.

Die Ursachen dafür sind im Schwingbild des Förderorgans zu finden. Neben angeregten Kipp- oder Taumelbewegungen sind der beabsichtigten Bewegung häufig noch eigendynamische Schwingungen der Struktur des Förderorgans selbst überlagert. Das Auftreten dieser dominanten Strukturschwingungen kann vor allem bei magneterregten Vibrationsförderern beobachtet werden.

Im folgenden Artikel wird die Ursache der störenden Strukturschwingungen unter anderem auf die Kraftverläufe an den erregenden Elektromagneten zurückgeführt. Untersuchungen an den Erregerstrom-, Spannungs-, und resultierenden Magnetkraftverläufen dienen als Vergleichskriterium für die unterschiedlichen Steuerungstypen.

2 TECHNISCHE GRUNDLAGEN

2.1 VIBRATIONSFÖRDERER

Ein Vibrationsförderer stellt ein dynamisches Mehr-Massen-Schwingsystem dar, welches durch die Antriebseinheit mit einer Kraft erregt wird. Es besteht grundlegend aus einem Förderorgan, einer Antriebseinheit mit Steuergerät und elastischen Lagerelementen. Es existieren zwei grundlegende Bauformen dieser Klasse von Stetigförderern.

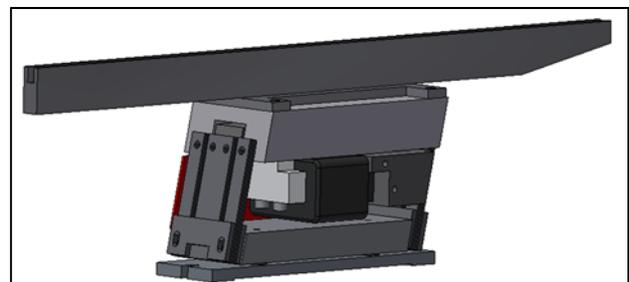


Abbildung 1. linearer Vibrationsförderer (LVF)

Lineare Vibrationsförderer (LVF), wie in Abb. 1 dargestellt, bestehen aus einer geraden Förderrinne und bewegen Güter entlang des Förderorgans von einem Startpunkt zu einem Endpunkt bzw. einer Übergabestelle. Die Antriebseinheit befindet sich unter dem Förderorgan, die

elastischen Lagerelemente sind in Förderrichtung entlang des Förderorgans angeordnet.

Vibrationswendelförderer (VWF) besitzen runde, topfförmige Förderorgane mit in der Topfwandung eingebrachten Wendeln. Die Hauptaufgabe dieser Förderer ist das Bunkern von Stückgütern kleiner bis mittlerer Abmessung und die prozessbedingte Lageorientierung durch zusätzliche Sortierschikanen in der Förderwendel. Die elastischen Lagerelemente und die elektromagnetischen Antriebseinheiten werden ebenfalls kreisförmig entlang des Grundkörpers angeordnet.

Elektromagnetische Antriebseinheiten werden für beide Bauformen verwendet und sind vor allem im Bereich der Kleinteilezuführung, wie bspw. Steckkontakte oder Verschlusskappen für Konsumgüter, weit verbreitet. Quellen: [Ris11, DRN12]

2.2 ELEKTROMAGNETISCHE TREIBEREINHEIT

Als elektromagnetische Antriebseinheiten in Vibrationsförderern werden sog. Schwingmagnete (Abb. 2) verwendet. Diese haben einen festgelegten Bereich der Arbeitsfrequenz, welcher durch die konstruktiven Eigenschaften des Magneten bestimmt wird. Die Wicklungen und Kernmaterialien sind auf diese Frequenzen optimiert. Wird der Schwingmagnet außerhalb seines Arbeitsfrequenzbandes betrieben kommt es zur Überhitzung durch zu hohe Ströme und zum Leistungsabfall. Die Arbeitsfrequenz des Schwingmagneten sollte auf die mechanische Arbeitsfrequenz des Förderers abgestimmt werden. Nur so kann ein Material schonender Betrieb im Leistungsoptimum der Antriebseinheit gewährleistet werden.



Abbildung 2. versch. Schwingmagnete mit Anker [MAS]

Der Anker des Schwingmagneten ist im montierten Zustand durch einen Luftspalt vom umwickelten Kern getrennt. Bei Bestromung des Magneten ist der magnetische Fluss bestrebt den magnetischen Widerstand zu verringern und erzeugt eine Zugkraft auf den Anker um ein homogenes magnetisches Feld zu erreichen. Die Magnetkraft F_{Magnet} des Elektromagneten entsteht somit aus dem die Spule durchfließenden Strom und nimmt quadratisch mit dem sich verringernenden Luftspalt zu. Der Schwingmagnet erzeugt am Steuergerät eine ohmsch-induktive Last, wobei der induktive Anteil deutlich überwiegt.

Der Erregerkraftverlauf der Magnete bestimmt maßgeblich die angeregten Schwingungen und Eigenfrequenzen im Schwingsystem selbst. Die Ansteuerung der Elektromagneten hat damit wesentlichen Einfluss auf das Schwingungsverhalten eines Förderers und bestimmt letztlich auch das Förderverhalten des Gutes.

2.3 STEUERGERÄTE

Für die Steuerung und Regelung von Vibrationsförderern mit elektromagnetischen Erregerseinheiten gibt es verschiedene Konzepte. In industriellen Anwendungen existieren zwei Hauptkategorien von Steuergeräten. Je nach Automatisierungsgrad werden entweder Phasenanschnittsteuerungen (Abb. 3) oder Frequenzumrichter (Abb. 5) genutzt. Die folgenden beiden Unterabschnitte verdeutlichen kurzgefasst die Grundlagen sowie Vor- und Nachteile der beiden Steuerungsmöglichkeiten.

Je nach Steuerungshersteller werden die grundlegenden Schaltungen erweitert um die Nachteile des jeweiligen Steuerungskonzeptes teilweise zu kompensieren. Diesen Kompensationsschaltungen sind für die Qualität der bewerteten Steuerung und auch für den Preis ausschlaggebend. Der genaue Aufbau der Steuerung und der Kompensationsschaltungen unterliegt bei allen untersuchten Herstellern der Geheimhaltung.

2.3.1 PHASENANSCHNITTSTEUERUNGEN

Unter diesem Überbegriff finden sich sowohl Phasenanschnittsteuerungen als auch Phasenabschnittsteuerungen. Beide Arten funktionieren ähnlich. Da sich aber nur Phasenanschnittsteuerungen für induktive Lasten eignen werden diese im Weiteren behandelt. Es handelt sich bei den genannten Arten von Steuerung um leistungselektronische Steller für Wechselspannungsverbraucher. Die Regelungsmethode ist eine Form der Pulsweitenmodulation (PWM). Dabei steht die Verstellung des Laststromes und daraus folgend die Leistungsregulierung der Last im Vordergrund. Die Steller dieser Bauart können die Erregerfrequenz des Elektromagneten nicht variabel beeinflussen und verwenden die Netzfrequenz von 50 Hz als Vorgabe. Die Betriebsarten dieser Steuergeräte unterscheiden sich in den Betrieb mit Vollwelle und den Betrieb mit Halbwelle. Abbildung 3 zeigt beispielhaft Steuerungen dieser Art von zwei verschiedenen Herstellern.

Im Halbwellenbetrieb wird eine Halbwelle der sinusförmigen Netzspannung durch ein elektrisches Bauelement abgeschnitten. Dazu dienen bspw. Dioden oder Triacs. In der Elektrotechnik wird dies Einpulsmittelpunkt-Schaltung genannt. Durch diese Betriebsart erhält man am Vibrationsförderer eine mechanische Arbeitsfrequenz von 50 Hz.



Abbildung 3. Phasenanschnittsteuerungen (v.l.) der Firma REO und der Firma M.P. Elettronica [REO, MPE]

In Steuerungen mit Phasenanschnitt sog. Wechselstromstellern werden als grundlegende elektronische Komponenten Thyristoren bzw. Triacs verwendet. Diese werden in jeder Halbperiode der Netzspannung neu angesteuert. Beim Unterschreiten des Haltestromes des Triacs wird in jeder Halbperiode der Netzspannung $u(\omega t)$ der Strom unterbrochen. Der Strom wird in der darauffolgenden Halbperiode der Netzspannung zeitverzögert nach dem Steuerungswinkel α eingeschaltet, siehe. Abb. 4. Der Laststrom $i_{R,L}(\omega t)$ fließt entsprechend der Lastspannung $u_{R,L}(\omega t)$ nach der Zuschaltung wieder bis zum Unterschreiten des Haltestromes. Diese Dauer wird durch den Stromflusswinkel λ charakterisiert. Für eine detaillierte Beschreibung der Vorgänge und Schaltungsunterschiede werden die für diesen Abschnitt verwendeten Quellen [Sch12, Mic11, BEO10, Spe15] empfohlen.

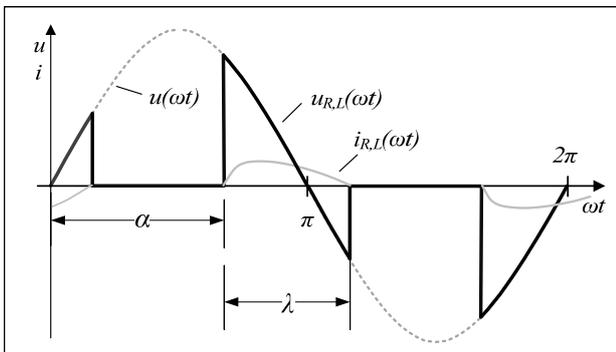


Abbildung 4. Spannungs- und Stromverlauf an einer Phasenanschnittsteuerung mit ohmsch-induktiver Last;

Phasenanschnitt- und Phasenabschnittsteuerungen weisen sehr geringe Leistungsverluste auf und bilden damit eine kostengünstige und störunanfällige Alternative zu regelbaren Schaltnetzteilen. Allerdings erzeugen sie nichtsinusförmige Spannungen. Diese Spannungsverläufe können elektronische Bauteile beschädigen. Ohmsche Bauelemente wie Widerstände und auch Spulen bzw. Elektromagnete werden dadurch primär nicht geschädigt.

Der nichtsinusförmige Verlauf des Stromes führt zu einer Verzerrungsblindleistung. Dabei eilt der Strom dem Spannungsverlauf hinterher dies führt zu einer zusätzlichen induktiven Belastung. Bei großen Leistungen müssen die Schaltungen der Regler erweitert werden um die induktiven Lasten nicht ins Netz abzugeben.

2.3.2 FREQUENZUMRICHTER

Die zweite große Gruppe der Steuerungsgeräte im Bereich der Vibrationsfördertechnik bilden die Frequenzumrichter (FU). Sie sind Stromrichter für Wechselspannungen und dienen dem Zweck, aus der vorgegeben Netzfrequenz von 50 Hz eine dem Verbraucher angepasste Frequenz zu erzeugen. FUs können eine Wechselspannung mit variabler Frequenz und Amplitude generieren. Im Bereich der Schwingtechnik gibt es am Markt spezielle FU, welche Eingänge für Beschleunigungsaufnehmer besitzen. Dadurch erkennt die Steuerung selbstständig die Resonanzfrequenz des Förderers und regelt die Erregerfrequenz bei Lastschwankungen nach. Abbildung 4 zeigt beispielhaft drei FU für den Betrieb von Elektromagnetischen Vibrationsförderern.



Abbildung 5. Frequenzsteuergeräte (v.l.) der Firma REO und der Firma M.P. Elettronica

Der Aufbau eines FU ist deutlich komplexer im Vergleich zur Phasenanschnittsteuerung. Es werden auch verschiedene Umrichterarten unterschieden. Die heutzutage am weitesten verbreitetste Umrichterart ist der Spannungszwischenkreisumrichter mit Pulsweitensteuerung. Dieser Umrichtertyp bietet bei hohen Pulsfrequenzen einen annähernd sinusförmigen Stromverlauf auf der Verbraucher- und Netzseite. Für tiefergreifendere elektrotechnische Zusammenhänge und weiter Umrichterarten können die Quellen [Spe15, Lin05] zu Rate gezogen werden.

Die Betriebsspannung des Verbrauchers wird mittels der PWM erzeugt (Abb. 6). Dabei soll der arithmetische Mittelwert der Halbwellen der Verbraucherspannung u_{AM} eine angenäherte Sinusform aufweisen. Es wird das Verhältnis der Periodendauer (T) in Bezug zur Impulsdauer t_{PW} für eine periodische Folge von Impulsen variiert. Das betragsmäßige Maximum der mittleren Verbraucherspannung u_{AM} wird durch den Puls mit der größten Pulsweite t_{PW} gebildet. Die Pulsweiten verringern und die Pulsphasen t_{PP} verlängern sich in Richtungen der Nulldurchgänge der Verbraucherspannung.

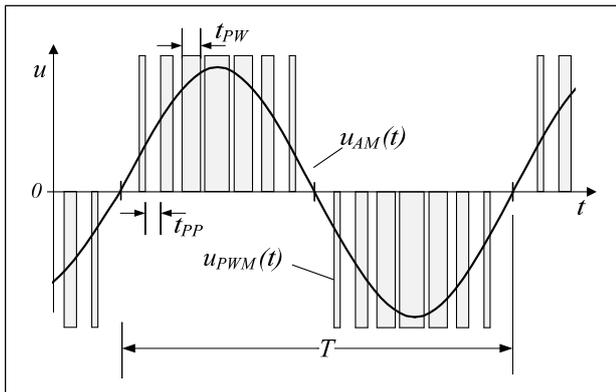


Abbildung 6. Funktionsschema der Pulsweitenmodulation

Es werden nicht, wie im Beispiel der Phasenschnittsteuerung die Spannungssignale durch einen bzw. zwei Pulse pro Periode zerteilt, sondern die komplette Spannung wird aus vielen kurzen und schnell aufeinander folgenden Spannungspulsen zusammengesetzt. Allgemein Arbeiten FU mit einer Pulsfrequenz von 3 kHz bis 16 kHz. Diese Frequenzen liegen im akustisch wahrnehmbaren Bereich des Menschen und sind der Grund für die typischen Pfeifgeräusche beim Betrieb von FUs. Außerdem führen das Pulsen der Spannung und des Stromes zu elektromagnetischen Störungen in der Umgebung. Dies muss durch Schirmungen der Kabel und des FU selbst kompensiert werden.

Ein weiterer Nachteil der FU-Technologie sind die sehr hohen Spannungsbeträge der einzelnen Pulse (u_{PWM}). Diese Überhöhungen folgen aus der Vorgabe der Sinusförmigkeit des arithmetischen Spannungsmittels und werden durch die Reflexion der Pulse an Grenzflächen des Kabels noch verstärkt. Diese Belastungsspitzen können zu Schäden an Isolatoren und Bauteilen führen.

3 MOTIVATION

In der Praxis sind Störfälle bei Vibrationsförderern häufig durch un stetigen Gutlauf entlang des Förderorgans, unterschiedlichen Fördergeschwindigkeiten entlang der Förderrinne bis hin zum Versiegen des Gutstromes oder Versagen von mechanischen Komponenten gekennzeichnet. Bei Schadensfallanalysen und Beschleunigungsmessungen an den Förderorganen und Unterkonstruktionen solcher Vibrationsförderer sind häufig dominante Strukturschwingungen oder ein nichtlineares Schwingbild messbar. Es existieren innerhalb dieser Schadens- und Problemfälle auch Vibrationsförderer mit sehr breiten Störschwingungs-Frequenzbändern. Oft ist unklar welche genauen Ursachen bestimmte Störschwingungen haben.

Eine Ursache für diese dominanten Schadschwingungen liegt in der gezielten Anregung dieser. Zu einer verstärkten Anregung von Strukturschwingungen im Förderorgan selbst und zu ungewollten Eigenschwingungen des mechanischen Aufbaus des Förderers können so-

nannte Oberschwingungen führen. Diese Schwingungen oberhalb der Betriebsfrequenz werden nicht für den Förderprozess benötigt. In Abbildung 7 ist das Frequenzspektrum für einen bei 100 Hz arbeitenden LVF dargestellt. In diesem Beispiel ist deutlich die erhöhte vierte Harmonische der Grundfrequenz erkennbar.

Die überproportional erhöhten ganzzahligen Harmonischen der Arbeitsfrequenz sind häufig bei elektromagnetisch erregten Vibrationsförderern zu finden. Sie resultieren auch aus den Oberschwingungen der Erregerströme. Neben den direkt messbaren Oberschwingungen im Förderer, welche aus dem Verlauf der Erregerkraft herrühren, ist der größere Risikofaktor die Anregung von Eigenformen der Förderorgane und der mechanischen Fördererstruktur.

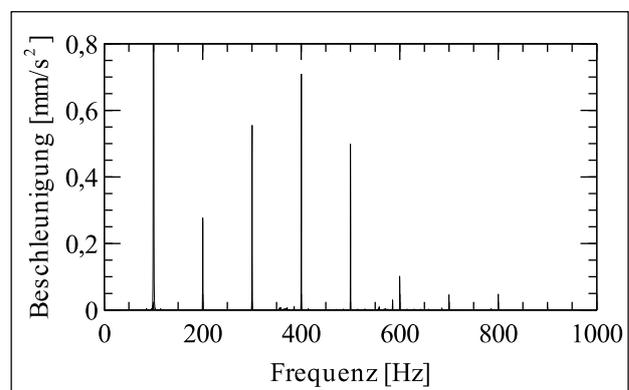


Abbildung 7. Beispielhaftes Frequenzspektrum für eine Beschleunigungsmessung bei unbelastetem Förderorgan

Die erzeugten Störschwingungen überlagern die Arbeitsfrequenz und beeinflussen das Laufverhalten des Gutes in nicht vorhersehbarer Weise. Sie sind somit für einen sicheren Anlagenbetrieb kontraproduktiv und ihre Ursache sollte erörtert und beseitigt werden.

4 MESSKETTE UND VERSUCHSAUFBAU

4.1 VERSUCHSSTAND

Für die Messungen der Magnetkraft in Abhängigkeit der Stromstärke und Spannung wurden verschiedene Vorversuche durchgeführt. Innerhalb dieser Vorversuche wurden die gesamte Messkette und der mechanische Aufbau des Versuchstandes variiert und angepasst. Es erfolgte die Auswahl des Kraftmessdosenverstärkers, der Strommesszange und des Datenloggers. Es wurde gezeigt, dass für eine getriggerte und synchrone Aufnahme von Strom, Spannung und Kraftsignal ein einziges Aufzeichnungsgerät die effektivste Methode darstellt.

Die ersten Versuche wurden an einer Zugprüfmaschine für quasistatische Lasten durchgeführt. Die Messergebnisse wurden von Schwingungen aufgrund der Eigendynamik der verwendeten Messkette überlagert. Die

Abstraten der Kraftmessdose der Zugprüfmaschine sind für die Aufnahme der mit 100 Hz pulsierenden Zugkraft ebenfalls unzureichend geeignet. Aus diesem Grund wurde ein kostengünstiger und biegesteifer Versuchstand konstruiert und aufgebaut.

Abbildung 8 zeigt die Konstruktionsskizze des Versuchstandes zur Messung der elektromagnetischen Kraft. Der Luftspalt zwischen Magnet und Anker wird über zusätzlich angebrachte Lasertriangulationssensoren eingestellt und während des Versuches überwacht. Dies dient zur Vermeidung von Falschmessungen durch Setzungen während des Betriebs. Die Lasersensoren sind nicht in der Skizze eingezeichnet.

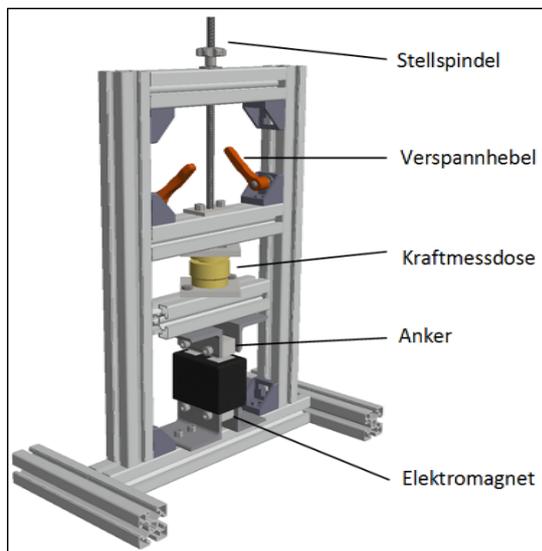


Abbildung 8. Konstruktionsskizze des Versuchstandes zur Messung der Magnetkraft

In den ersten Messreihen wurden die Spannungen und Ströme über der Last mittels eines Netzanalysators vom Typ CA 8335 ausgewertet (Abb. 9). Dieser ist nur für Frequenzen nahe der Netzfrequenz von 50 Hz geeignet und kann nur für Messungen an den Phasenanschnittsteuerungen verwendet werden. Durch die Erweiterung der Testreihen auf FU mit einer Pulsfrequenz von ca. 14 kHz wurde ein weiteres Messgerät benötigt.

Der Aufbau der aktuellen Messkette ist in Abbildung 10 schematisch dargestellt. Als Datenlogger und Anzeigergerät für die Signale der Spannung und Stromstärke an der Last sowie der resultierenden Kraft wird nun das Oszilloskop DLM2024 der Firma Yokogawa mit einer Abtastrate von 2,5 GS/s verwendet (Abb. 9). Das Signal der Kraftmessdose U3/2kN wird durch einen Messverstärker vom Typ Spider8 verstärkt. Beide Geräte sind von der Firma HBM.

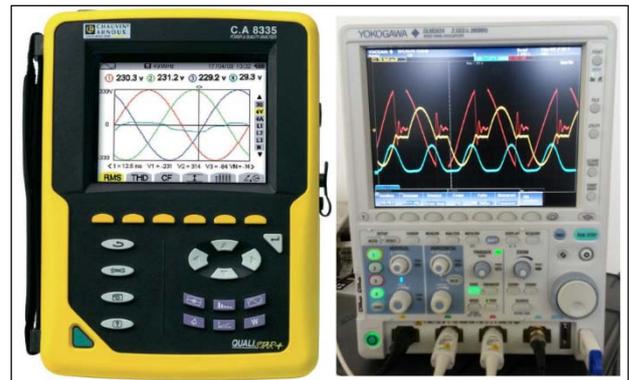


Abbildung 9. Netzanalysator CA 8335 (links), Digitales Speicher Oszilloskop DLM2024 (rechts)

Das Steuergerät wird mit Netzspannung betrieben und sorgt für eine entsprechende Bestromung des Elektromagneten. Dieser wirkt mittels einer Zugkraft auf den Magnetanker. Diese Zugkraft wird durch die Kraftmessdose in Spannungen umgewandelt, welche der Messverstärker verstärkt und an das Oszilloskop weiterleitet. Die Stromstärke am elektromagnetischen Verbraucher wird mittels einer Strommesszange in äquivalente Spannungen umgewandelt und zum Oszilloskop übertragen. Die Spannung des Verbrauchers wird direkt mit dem Oszilloskop gemessen.

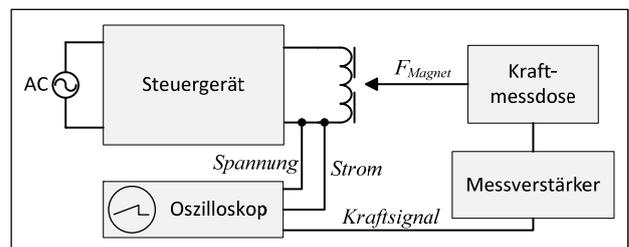


Abbildung 10. Messkette des Magnetzugkraftversuchsstandes

Alle ausgewerteten Messreihen wurden nach dem aktuellen Versuchsaufbau durchgeführt um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Im Folgenden sind die variierenden Parameter der Messungen dargelegt.

4.2 PARAMETER

Die Versuchsreihen umfassten Messungen an verschiedenen Schwingmagnettypen und unterschiedliche Steuerungen. Es wurden Messungen an vier verschiedenen Elektromagneten durchgeführt. Dabei wurden an jedem Elektromagnet alle zu untersuchenden Steuerungen mit den Leistungseinstellungen 30 %, 50 %, und 100 % Antriebsleistung getestet.

Die Luftspalte zwischen Magnet und Anker wurden für diese Messungen auf den Nennwert des jeweiligen Magneten eingestellt. In den meisten Fällen betrug dieser 3 mm. Für einzelne ausgewählte Steuergerät-Magnetkombinationen wurden die Luftspalte von 0,5 mm bis 5 mm in 0,5 mm Schritten variiert.

Alle Versuchskonfigurationen hielten die Herstellerangaben der Steuergeräte ein, d.h. keiner der Elektromagnete überschritt die zulässigen Lastgrenzen der Steuerungen um Überlastungseffekte auszuschließen.

5 ERGEBNISSE UND INTERPRETATION

5.1 ALLGEMEIN

Im aktuellen Versuchsaufbau konnten die Überschwingungen der gemessenen Kräfte im Vergleich zu den Voruntersuchungen deutlich reduziert werden. Dennoch bilden der Anker als schwingende Masse und die Kraftmessdose als Feder ein dynamisches System, welches bei bestimmten Frequenzen zu Überschwingungen neigt. Alle in den Messungen sichtbaren Druckkräfte (negativer Kraftanteil) resultieren aus der Schwingungsanregung der Messkettendurch die pulsierende Magnetkraft.

Die verwendeten Elektromagnete und Ansteuerungen erzeugen ausschließlich Zugkräfte.

5.2 PHASENANSCHNITT

Die folgenden Messwertverläufe der Abb. 11 bis Abb. 14 sind beispielhaft für die Spannungs-, Strom-, Kraftverläufe an den Phasenanschnittsteuerungen und den daraus resultierenden Spektren. Abhängig vom Zündzeitpunkt der Triacs werden oberwellenreiche bzw. oberwellenarme Ströme an der Last generiert. Hier zeigen sich deutliche Unterschiede zwischen den einzelnen Herstellern.

Die Spektren sind abhängig von der Betriebsart Voll- oder Halbwelle unterschiedlich zu interpretieren. Die in Abb. 11 und Abb. 12 vorliegende Betriebsart ist die Vollwelle, d.h. die Frequenzen des Stromes sind den doppelten Frequenzen der Magnetkräfte zuzuordnen.

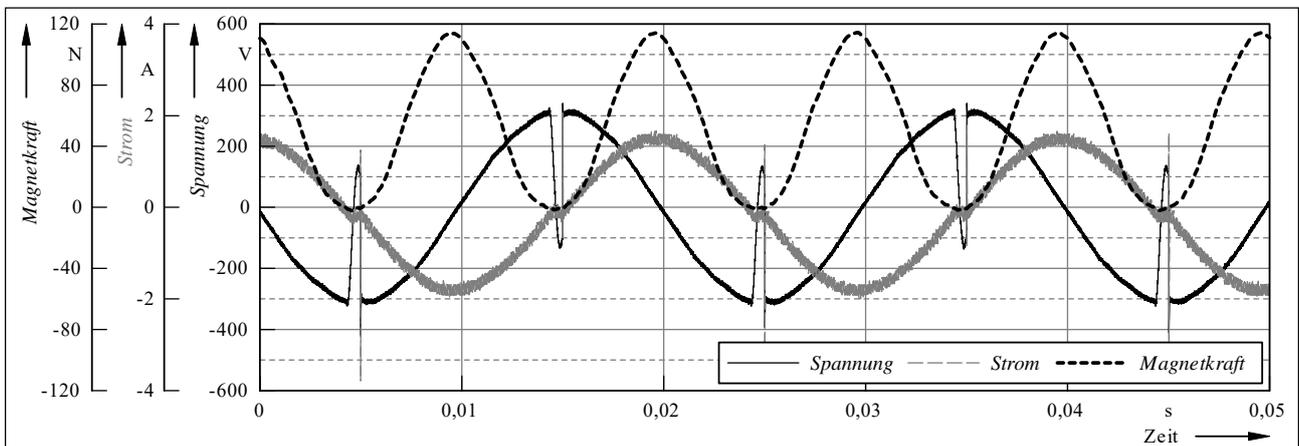


Abbildung 11. Verläufe des Laststromes, der Spannung über der Last und der resultierenden Magnetkraft an einem Phasenanschnittsteuergerät bei maximal eingestellter Amplitude

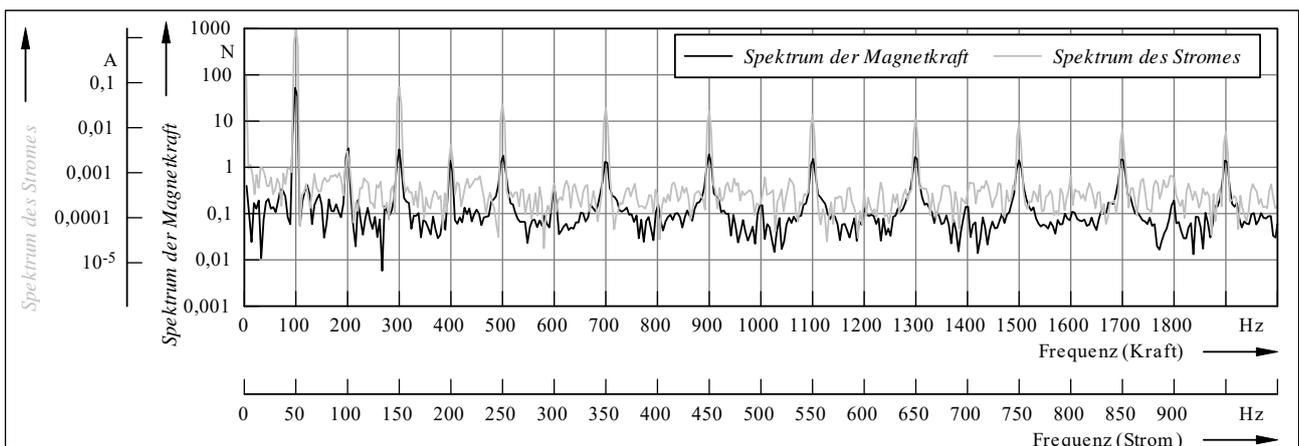


Abbildung 12. Frequenzspektren der Kraft und des Stromes an einem Phasenanschnittsteuergerät bei maximal eingestellter Amplitude und Vollwellenbetrieb

Die Messung der Abb. 11 entspricht einer Steuereinstellung der Leistungsstufe 100 %. Der Verlauf der Spannung am Verbraucher weist nur eine sehr geringe

Unterbrechung auf. Die Spannungsamplituden liegen bei ca. 300 V. Im Zündzeitpunkt des Triacs beim Zuschalten der Spannung sind einzelne Strompeaks von bis zu 3,6 A

erkennbar. Diese sind vor allem auf der negativen Halbwelle der Spannung sichtbar. Vermutlich werden die positiven Strompeaks durch eine Kompensationsschaltung abgefangen.

Die Kurvenform der Magnetkraft weicht rein optisch betrachte nur leicht von einem reinen Sinus ab. Das aus der Kraft resultieren Spektrum in Abb. 12 zeigt Kraftamplituden hochfrequenter Schwingungsanteile von bis

zu 2 N diese Anteile deuten auf eine nichtsinusförmige Kraft hin. Dabei zeichnet sich die mechanische Arbeitsfrequenz des Magneten von 50 Hz deutlich ab

Im Vergleich zwischen dem Kraft und Stromspektrum ist eine Übereinstimmung der Oberwellenanteile des Stromes und der Oberwellenanteilen des Kraftsignals sichtbar. Dies deutet auf den vermuteten Einfluss der Steuergeräteeigenschaften auf den erzeugten Erregerkraftverlauf hin.

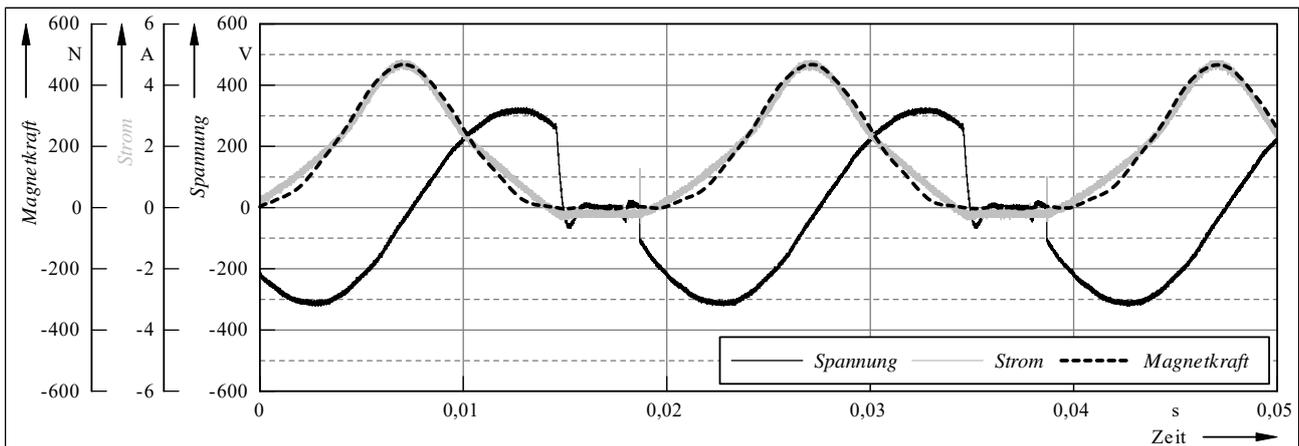


Abbildung 13. Verläufe des Laststromes, der Spannung über der Last und der resultierenden Magnetkraft an einem Phasenanschnittsteuergerät bei maximal Eingestellter Amplitude (Halbwellenbetrieb)

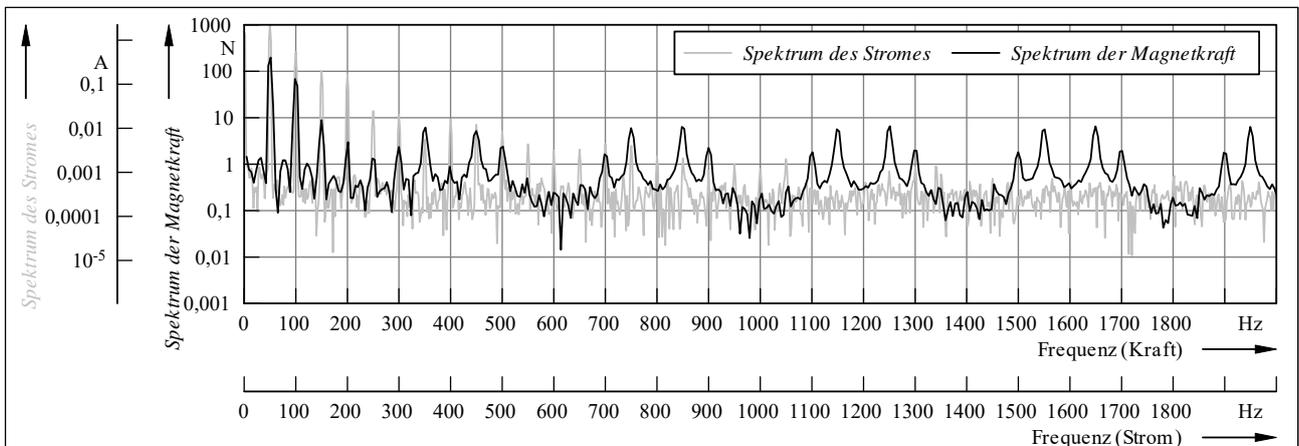


Abbildung 14. Frequenzspektren der Kraft und des Stromes an einem Phasenanschnittsteuergerät bei maximal Eingestellter Amplitude (Halbwellenbetrieb)

Abb. 13 und Abb. 14 zeigen Messwertverläufe an einer Phasenanschnittsteuerung eines anderen Herstellers. Es besitzt eine deutlich höhere Leistung und einen völlig anderen Anschnitt- und Zündzeitpunkt als das Vergleichsgerät aus Abb. 11 und Abb. 12. Bei der hier vorliegenden Betriebsart handelt es sich um den Halbwellenbetrieb. Die mechanische Arbeitsfrequenz des Magneten beträgt in dem Fall 50 Hz. Das Steuergerät wird ebenfalls bei einer Leistungseinstellung von 100 % betrieben.

In Abb. 13 ist deutlich der stark nichtsinusförmige Charakter des Kraftsignals und die gute Deckung mit dem Verlauf des Stromes erkennbar. In Abb. 14 wird die Ab-

weichung von der Sinusform durch die hohen Amplituden der Oberwellen im Strom und Kraftsignal deutlich. Auch in diesem Beispiel decken sich die vom Strom vorgegebenen hochfrequenten Schwingungsanteile mit denen der Magnetkraft.

Außerdem ist die Anregung eines Frequenzmusters innerhalb der mechanischen Messkette sichtbar, welche wahrscheinlich aus den Anregungen im Frequenzband von 350 Hz bis 450 Hz herrührt.

5.3 FREQUENZUMRICHTER

Die Messwertverläufe der Abb. 15 und Abb. 16 sind beispielhaft für die Spannungs-, Strom-, Kraftverläufe an den FU und den daraus resultierenden Spektren. Die Frequenz des Stroms und die Frequenz der mechanischen Arbeitsspannung stimmen bei diesem FU überein. Durch die schnell, wie hier im Beispiel mit 14 kHz, gepulsten Spannungen und Ströme entstehen Spektren mit deutlich höherem Grundrauschen.

Die Magnetkraftverläufe in Abb. 15 zeigen auch bei Verwendung eines speziellen FU für Schwingmagnete einen nichtsinusförmigen Verlauf der Magnetkraft. Die Spannungen und Ströme über der induktiven Last werden während des Betriebs ständig elektronisch durch den FU

nachgeregelt. Dies führt zu leicht abweichenden Signalverläufen von Periode zu Periode. Im Vergleich zu den Phasenanschnittsteuerungen sind die Frequenzspektren des Stromes der Messungen in Abb. 16 durch den schnell pulsierenden Strom und die ständige interne Nachreglung der Stellgrößen mit einem deutlich stärkeren Grundrauschen belastet. Dieses Grundrauschen mit einem relativ hohen Grundpegel bietet die Möglichkeit einer breitbandigen Anregung von Störschwingungen.

Die zweite dritte und vierte Harmonische der erzeugten Stromfrequenz sind auch bei dem hier vermessenen FU sichtbar und führen zu einer Anregung der äquivalenten Harmonischen bzgl. der Magnetkraft und derer höheren Vielfachen.

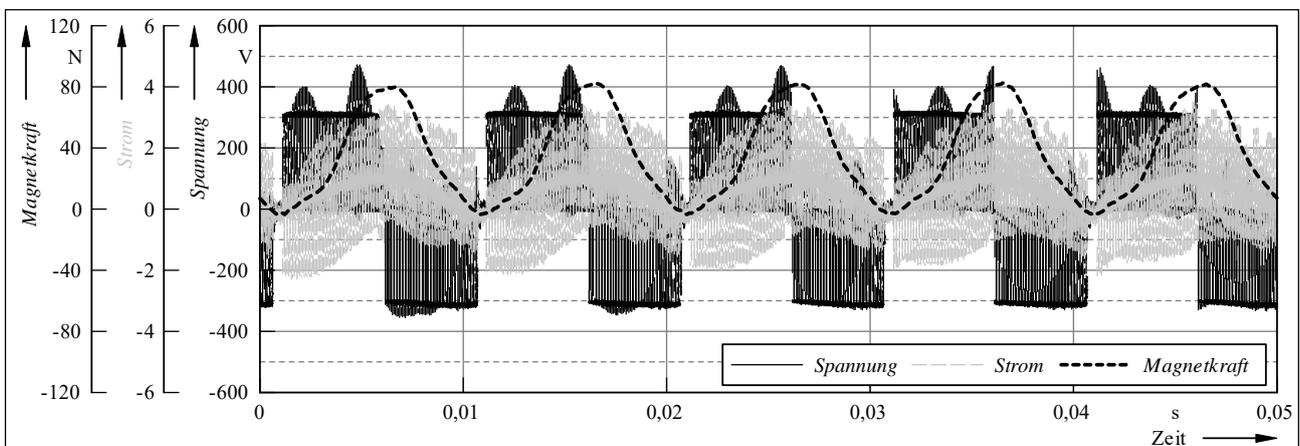


Abbildung 15. Verläufe des Laststromes, der Spannung über der Last und der resultierenden Magnetkraft an einem Frequenzumrichter für Schwingmagnete

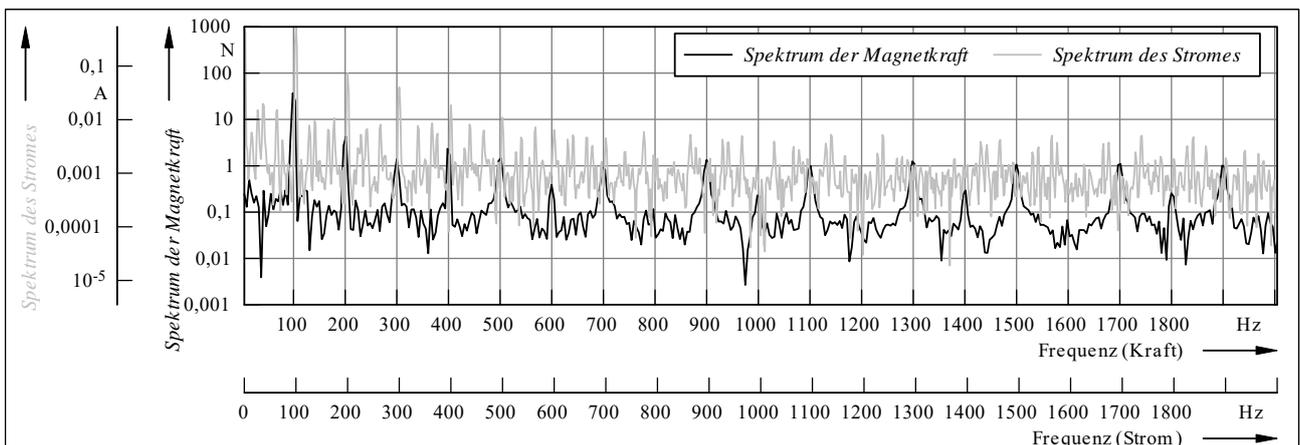


Abbildung 16. Frequenzspektren der Kraft und des Stromes an einem Phasenanschnittsteuergerät bei maximaler eingestellter Amplitude und Vollwellenbetrieb

5.4 FREQUENZSTABILITÄT

An den Phasenanschnittsteuerungen wurden zusätzlich Messungen der Frequenzstabilität durchgeführt. Diese bezieht sich auf die Schwingfrequenz des Magneten über einen längeren Zeitraum. Sie drückt die Abweichung dieser Schwingfrequenz von den Vorgabeeinstellungen am

Steuergerät aus. Für einzelne Versuchskonfigurationen wurde dies an den Phasenanschnittsteuerungen aller untersuchten Hersteller über einen Zeitraum von einer Stunde durchgeführt. Alle Steuerungen garantierten einen frequenzstabilen Betrieb im Toleranzbereich von $\pm 0,05\%$ der Vorgabefrequenz.

6 FAZIT

Die Oberwellen des Stromes über der Last beeinflussen die Kurvenform der magnetischen Erregerkraft in einem Vibrationsförderer. Auch wenn die Oberwellen keinen dominanten Kraftanteil hervorrufen können sie dennoch Eigenformen der Förderorgane und des gesamten mechanischen Aufbaus des Förderers hervorrufen. Diese behindern im ungünstigsten Fall den Förderprozess oder bringen den Förderstrom zum Erliegen.

Leider ist es für den Endanwender in den meisten Fällen nicht ersichtlich, welches Steuergerät ein besonders oberwellenarmes bzw. reiches Signal produziert. Es ist demnach unumgänglich auf eine steife Konstruktion zu achten. Dies verschiebt die Eigenformen in höhere Frequenzbereiche und macht den Förderer unanfälliger gegen Störschwingungen.

Bei störenden Schwingungsmustern durch dominante Eigenmoden in Vibrationsförderern kann bei nicht detektierbaren mechanischen Ursachen ein Wechsel des Steuergerätes durchaus eine Verbesserung des Schwingungsverhaltens bringen. Diese Maßnahme sollte falls möglich durch Messungen der Strom- und Spannungsverläufe an den Elektromagneten begleitet werden.

LITERATUR

- [BEO10] Böhmer, E.; Ehrhardt, D. & Oberschelp, W.: *Elemente der angewandten Elektronik: Kompendium für Ausbildung und Beruf*, Vieweg+Teubner Verlag, 2010, ISBN 978-3-834-89336-9
- [DRN12] Dallinger N, Risch T, Nendel K (2012): *Simulation von Förderprozessen bei Vibrationsförderanlagen*, Logistics Journal, Vol. 2012
- [Mic11] Michel, M.: *WS-Umrichter, Wechselstromsteller; Leistungselektronik: Einführung in Schaltungen und deren Verhalten*, Springer Berlin Heidelberg, 2011, ISBN 978-3-642-15984-8, DOI 10.1007/978-3-642-15984-8_8, S. 263-287
- [Lin05] Linse, H. & Fischer, R.: *Elektronik Elektrotechnik für Maschinenbauer: Grundlagen und Anwendungen*, Vieweg+Teubner Verlag, ISBN 978-3-322-92781-1, 2005, S. 109-186
- [Ris11] Risch, T.: *Zweidimensionale Bewegungsformen in der Vibrationsförder-technik*, Dissertationsschrift, Professur Fördertechnik, TU Chemnitz, 2011
- [Sch12] Schröder, D.: *Leistungselektronische Schaltungen: Funktion, Auslegung und Anwendung*, Springer Berlin Heidelberg, 2012. ISBN 978-3-642-30104-9, DOI 10.1007/978-3-642-30104-9_2
- [Spe15] Specovius, J.: *Grundkurs Leistungselektronik: Bauelemente, Schaltungen und Systeme*, Springer Fachmedien Wiesbaden, ISBN 978-3-658-03309-5, 2015, S. 327-344
- [MAS] Magnet-Schultz GmbH & Co. KG (2016), <http://www.magnet-schultz.com/>
- [REO] REO AG (2016), <http://www.reo.de/>
- [MPE] Mp Elettronica Srl (2016), <http://www.mpelettronica.com/>

Dipl.-Ing. Niels Dallinger, Scientific Assistant at the Professorship of Materials Handling and Conveying Engineering.

Niels Dallinger was born 1983 in Burgstädt, Germany. Between 2003 and 2011 he studied Mechanical Engineering at the University of Technology Chemnitz.

Address: Professorship of Materials Handling and Conveying Engineering, TU Chemnitz, Reichenhainer Str. 70, 09126 Chemnitz, Germany,
Phone: +49 371 531-37436, Fax: +49 371 531-837436
E-Mail: niels.dallinger@mb.tu-chemnitz.de

Dr.-Ing. Thomas Risch, Scientific Assistant at the Professorship of Materials Handling and Conveying Engineering.

Thomas Risch was born 1979 in Karl-Marx-Stadt, Germany. Between 1999 and 2005 he studied Mechanical Engineering at the University of Technology Chemnitz.

Address: Professorship of Materials Handling and Conveying Engineering, TU Chemnitz, Reichenhainer Str. 70, 09126 Chemnitz, Germany
Phone: +49 371 531-35166, Fax: +49 371 531-835166
E-Mail: thomas.risch@mb.tu-chemnitz.de