

NCTE AG
Non-Contact Torque Engineering
82041 Oberhaching

**„Entwicklung eines energieeffizienten Verfahrens
zur Produktion neuartiger
Drehmomentsensorik für E-Bikes und Pedelecs“**

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,
gefördert unter AZ 34600 Ref.01/21 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Dipl.-Ing. Verena Graf, CEO und Dipl.-Ing. (FH) Theo Mager

Dezember 2020

Inhaltsverzeichnis

I.	Verzeichnis der Bilder, Zeichnungen und Grafiken	03
II.	Verzeichnis der Tafeln.....	04
III.	Verzeichnis der verwendeten Begriffe, Abkürzungen und Definitionen	05
1.0	Zusammenfassung	06
2.0	Einleitung.....	07
3.0	Hauptteil	12
3.1	Darstellung der einzelnen Arbeitsschritte, der angewandten Methoden und der erzielten Ergebnisse	12
3.1.1	Darstellung der einzelnen Arbeitsschritte	12
3.1.2	Darstellung der angewandten Methoden.....	17
3.1.3	Darstellung der tatsächlich erzielten Ergebnisse.....	22
3.2	Diskussion der Ergebnisse	23
3.3	Ausführliche ökologische, technologische und ökonomische Bewertung der Vorhabensergebnisse	24
3.3.1	Ökologische Bewertung.....	24
3.3.2	Technologische Bewertung	24
3.3.3	Ökonomische Bewertung	25
3.4	Darlegung der Maßnahmen zur Verbreitung der Vorhabensergebnisse	26
4.0	Fazit.....	27
5.0	Literaturverzeichnis	28

I. Verzeichnis der Bilder, Zeichnungen und Grafiken

Abb. 1	Seite 08	= Hysterese-Kurve eines ferromagnetischen Werkstoffs
--------	----------	--

Abb. 2	Seite 09	= Verlauf der Neukurve
--------	----------	------------------------

Abb. 3	Seite 10	= Tretlager eines E-Bikes mit Drehmomentsensorik
--------	----------	--

Abb. 4	Seite 14	= Zeitlicher Verlauf eines Stromimpulses bei der Kondensatorentladung zur Magnetisierung
--------	----------	--

Abb. 5	Seite 16	= Kondensatorentladungen zur erforderlichen Magnetisierung
--------	----------	--

Abb. 6	Seite 17	= Pulsvorgang zur Magnetisierung, aktueller Stand – Wellentyp A
--------	----------	---

Abb. 7	Seite 18	= Pulsvorgang, aktueller Stand in der Serienproduktion bei Wellentyp B
--------	----------	--

Abb. 8	Seite 18	= Pulsvorgang mit optimierter Widerstandsbestimmung
--------	----------	---

Abb. 9	Seite 19	= Pulsvorgang mit optimierter Widerstandsbestimmung und optimierter Sollstromrampe
--------	----------	--

Abb. 10	Seite 20	= Verlauf der Kondensatorspannung bei einer Magnetisierung ohne vorzeitiges Abschalten des Pulsstromes
---------	----------	--

Abb. 11	Seite 21	= Stromverlauf eines Strom-Pulses, der kurz nach Erreichen des Maximums abgeschaltet wird, um Energie zu sparen:
---------	----------	--

Abb. 12	Seite 21	= Verlauf der Kondensatorspannung bei einer Magnetisierung mit verkürzten Pulsen
---------	----------	--

Abb. 13	Seite 22	= Spannungsverlauf schematisch bei verkürzten Pulsen; das Dreieck entspricht der Energieeinsparung je einer Magnetisierung
---------	----------	--

Abb. 14	Seite 25	= Entmagnetisierung durch Gleichfeld-Umpolung
---------	----------	---

II. Verzeichnis der Tafeln: entfällt

III. Verzeichnis der verwendeten Begriffe, Abkürzungen und Definitionen

€	=	Euro
€/a	=	Kosten pro Jahr
€/kWh	=	Kosten je Kilowattstunde
µm	=	10 ⁻⁶ m
Â/m	=	Magnetische Feldstärke
AP	=	Arbeitspaket
ARM	=	Advanced RISC Machines, englisches Mikroprozessor-Design
AZ	=	Aktenzeichen
B	=	Magnetische Flussdichte in Tesla
BImSchV	=	Bundesimmissionsschutz-Verordnung
cdm ³	=	Kubikdezimeter = Liter
cm ²	=	Flächenmaß
CO ₂	=	Kohlendioxid, 10 ³ Ampere
d	=	Tag
DBU	=	Deutsche Bundesstiftung Umwelt in 49090 Osnabrück
GWh/a	=	Gigawattstunden pro Jahr
h	=	Stunde
H _c	=	Koerzitifeldstärke in [A/m]
J, kJ	=	Joule bzw. Kilojoule, Energieeinheit
kA	=	Kilo-Ampere
kg	=	Kilogramm
kW	=	Kilowatt
kWh	=	Kilowattstunde
kWh/a	=	Kilowattstunden pro Jahr
ms	=	Millisekunde
mT	=	10 ⁻³ Tesla
mV	=	10 ⁻³ Volt
N/m	=	Drehmoment
Ø	=	Durchmesser
T	=	Tesla; magnetische Flussdichte; 1 T = 10 000 Gauß
USB	=	Universal Serial Bus, serielles Bus-System
WEA	=	Windenergieanlagen

1.0 Zusammenfassung

Zur Drehmomentmessung an den Tretlagerwellen von Pedelecs eignet sich die neue Technologie der magnetostriktiven Drehmomentmessung hervorragend. Allerdings erfordert diese Sensorik, dass die zu messenden Wellen bis zur Remanenz magnetisiert werden bei radialem Verlauf des Magnetfeldes. Um diese Magnetisierung zu erreichen sind bisher bis zu sieben elektrische Stromimpulse mit 4 bis 10 kA, axial in einem definierten Längenbereich erforderlich, da an den einzelnen Wellen unterschiedliche Kontaktwiderstände vorliegen. Die entsprechenden Leistungen summieren sich bei erwarteten großen Stückzahlen zu Jahresverbräuchen im Bereich von MWh. Angesichts steigender Nachfrage nach E-Bikes wird ein Anstieg auf bis zu 500.000 Stück/a mit entsprechender Zunahme des Energieverbrauchs erwartet.

Ziel des FuE-Projektes war deshalb die Reduzierung des Energieverbrauchs zur Magnetisierung der Tretlagerwellen für Fahrrad – Tretlager, um möglichst bis > 50% dadurch, dass eine automatisch arbeitende Vorrichtung entwickelt wird, die in der Serie jeweils den Kontaktwiderstand misst und die zur Magnetisierung erforderliche Kondensatorladung für einen ausreichenden Stromstoß je Welle berechnet und zur Verfügung stellt.

Das Vorhaben wurde wie geplant durchgeführt. Allerdings konnte die angepeilte Energieeinsparung nicht im vollen Umfang erreicht werden, da ein einzelner Stromstoß zur Erzeugung der benötigten Feldstärke nicht ausreicht. Bei der Magnetisierung muss die sogenannte Neukurve durchfahren werden, was einen zeitlichen Ablauf des Magnetisierungsstroms oder einige Stromimpulse bedingt. Die erzielte Energieeinsparung können wir trotzdem mit 30% beziffern, sodass das FuE-Projekt mit Erfolg abgeschlossen werden konnte.

2.0 Einleitung

Ausgangssituation

Das Unternehmen entwickelt berührungslose Sensorik zur Drehmomentmessung, die auf dem magnetostriktiven Effekt basiert. Er besagt, dass ferromagnetische Werkstoffe bei Anlegen eines Magnetfelds ihre Geometrie ändern. Der Effekt ist umkehrbar und wird dann als "magnetoelastischer Effekt" bezeichnet. Dabei handelt es sich um die Wechselwirkung zwischen der mechanischen Belastung und der dadurch verursachten Formänderung eines Prüflings einerseits und den dadurch bedingten Änderungen der magnetischen Induktion bzw. der magnetischen Feldstärke in ferromagnetischen Stoffen andererseits. Dieses Wirkprinzip der Magnetostriktion beruht auf der Ausrichtung von mikroskopisch kleinen, magnetischen Einheiten (Weiß'schen Bezirken) in ferromagnetischen Werkstoffen. Deren Ausrichtung kann durch zuvor eingeprägte Magnetfelder verstärkt werden, sodass dem Drehmoment proportionale Änderungen des Magnetfelds ΔB im Luftspalt unmittelbar an der Wellenoberfläche gemessen werden können. Diesen inversen Effekt nutzt unser Unternehmen für die Entwicklung und Fertigung einer berührungslosen Messtechnik zur Detektion von Kräften und Drehmomenten ab etwa 1 [N m] bis > 7500 [kN m].

Voraussetzung für die Drehmomentmessung ist eine spezielle, einmalige Magnetisierung der zu prüfenden Welle bis über die Remanenz (Punkt B_R auf der bekannten Hysterese-Kurve $B = f(H)$, siehe Abb. 1. Bei großen Wellen erfolgt die Magnetisierung in achsparallelen Streifen rund um den Umfang, bei kleineren Wellen kann die gesamte Welle magnetisiert werden. Die erzeugten Magnetfelder liegen je nach Durchmesser im Bereich bis etwa 20 [mT], sind also so schwach, dass keine ferromagnetischen Partikel angezogen werden und haften bleiben. Zur Magnetisierung der Wellen in den Remanenzbereich sind bisher bis zu 12 Stromimpulse je nach Wellendurchmesser von 4 bis 10 kA erforderlich mit folgenden Aufgaben:

1. Entmagnetisierung der Welle, d.h. Entfernen möglicher Vormagnetisierungen, abhängig von der Koerzitivfeldstärke des Wellenmaterials,
2. bis zu 7-stufiges Hochstrom-Impulsverfahren,
3. magnetische Glättung.

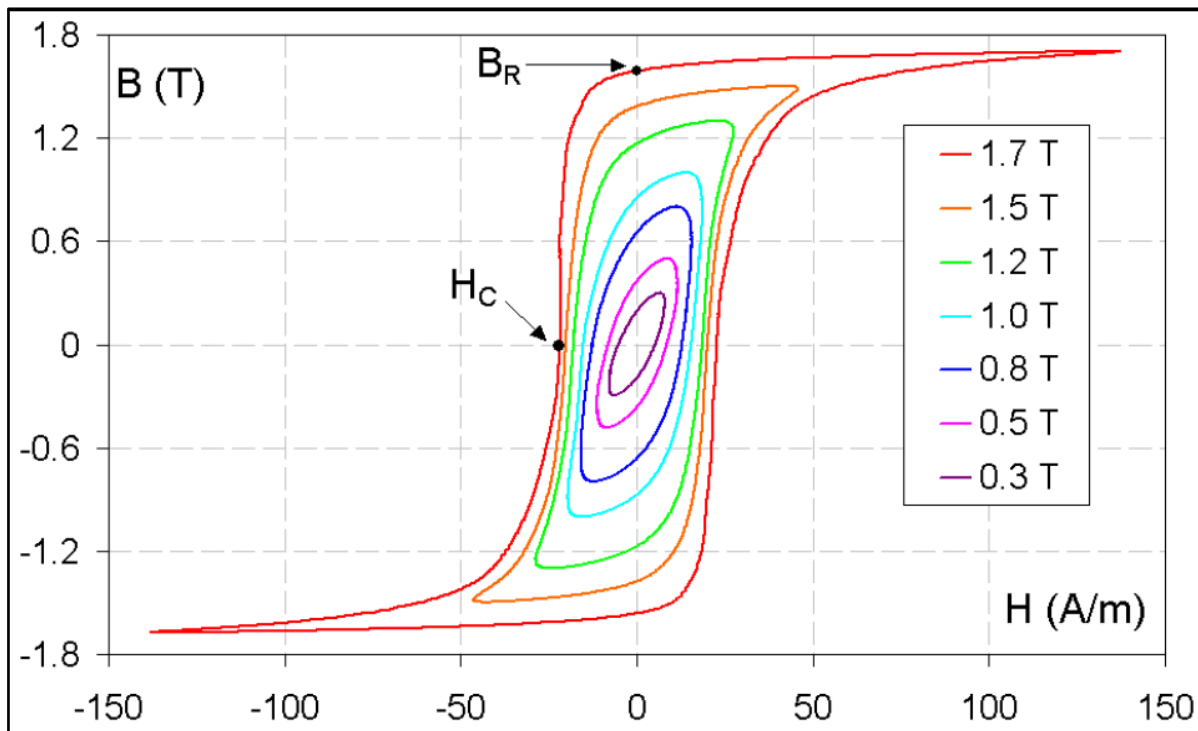


Abbildung aus Wikipedia

Abbildung 1: Hysterese-Kurve eines ferromagnetischen Werkstoffs (Beispiel)

H_c = Koerzitivfeldstärke in [A/m]

B_R = Beginn der Remanenz [T]

B_R wird über die sogenannte [magnetische Flussdichte](#) definiert in den Einheiten [Tesla](#) oder [Gauß](#),
mit der Umrechnung $1 \text{ [T]} = 1 \text{ Tesla} = 10\,000 \text{ Gauß} = 10 \text{ [kG]}$

Der Bereich $-H_c$ bis $+H_c$ ist bei magnetisch weichem Material schmal und verbreitert sich entsprechend der Koerzitivfeldstärke H_c bis zu einem Maximum bei Dauermagneten. Danach richtet sich die erforderliche Energie zum Ummagnetisieren zwischen $+H_c$ und $-H_c$. Die Fläche, die durch die Hysteresekurven umschlossen wird, hat die Dimension einer Energie, bekannt als „Hystereseverluste“. Dieser führt z. B. bei Transformatoren aufgrund der Wechselfelder zur Erwärmung.

Im vorliegenden Fall liegen magnetische Stahlsorten in einem unbestimmten Magnetzustand vor. Als erster Arbeitsschritt ist deshalb eine Entmagnetisierung der Wellen erforderlich. Deshalb muss bei der erneuten, von uns definiert vorgenommenen Magnetisierung von der sogenannten Neukurve ausgegangen werden, die in der folgenden Abbildung dargestellt ist.

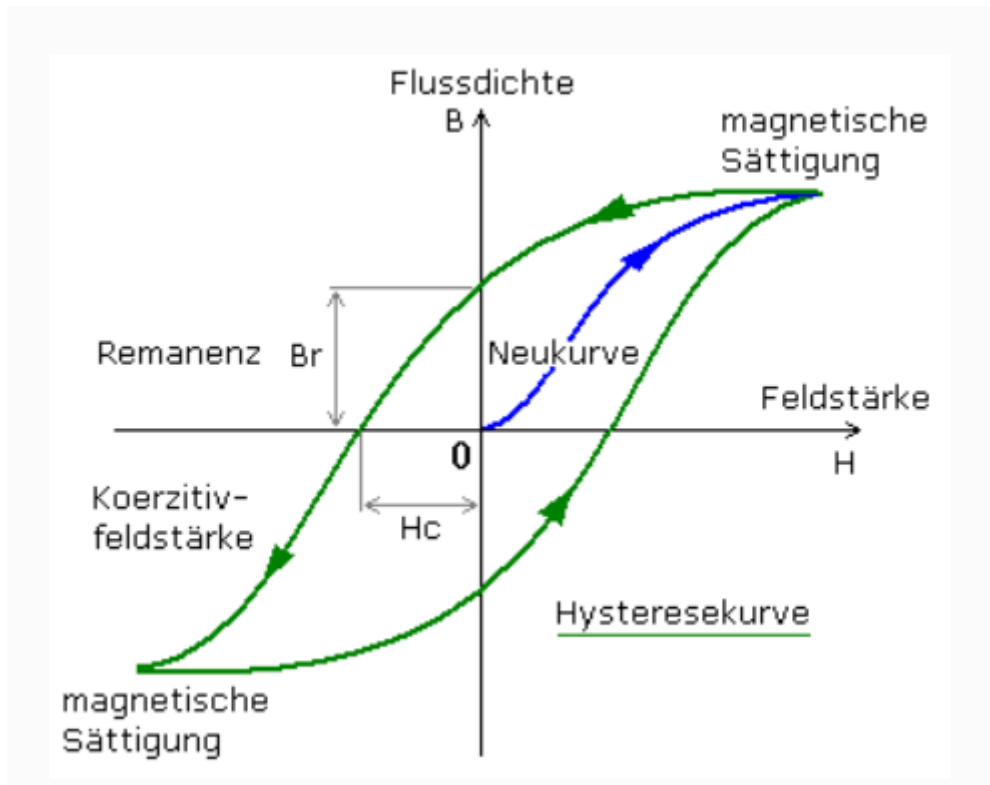


Abbildung aus elektroniktutor.de

Abbildung 2: Verlauf der Neukurve

Um die Welle entlang der Neukurve in den Bereich der magnetischen Sättigung zu bringen, ist somit eine elektrische Leistung erforderlich, die sich aus der gewünschten magnetischen Feldstärke und dem Querschnitt der Wellen ergibt. Bisher wurden die betreffenden Wellen mittels Kondensatorentladungen magnetisiert, die solange aufeinander folgten, bis die gewünschte Remanenz erreicht wurde. Trotzdem war der Energieverbrauch dafür in der Summe gering, da die produzierten Stückzahlen z.B. für WEA oder für Anwendungen im Maschinenbau relativ klein waren.

Nun konnten jedoch namhafte Hersteller von Pedelecs und E-Bikes, für den Einsatz unserer innovativen Drehmomentsensorik gewonnen werden. Bei Pedelecs besteht die Vorschrift, dass der E-Motor eine gewisse Leistung des Fahrers voraussetzt. Erst wenn ein Drehmoment an der Tretkurbel anliegt, darf die Motorunterstützung einsetzen. Dieses Drehmoment kann mit unserer Sensorik vorteilhaft gemessen werden. Zugelassene Pedelecs verfügen über einen Elektromotor von 250 [W] bei einem Drehmomentbereich 60 bis 70 [N m]. Die Leistung von E-Bike-Motoren beträgt 500 [W]. Für die vorliegende Entwicklung wurde deshalb ein Messbereich von 20 bis 200 [N m] festgelegt. Mit dem gleichen Messsystem können auch Drehzahl und Drehrichtung erfasst werden. Ein mit der Drehmomentmesstechnik ausgerüstetes Tretlager ist in Abbildung 3 dargestellt.



Abbildung 3: Tretlager eines E-Bikes mit Drehmomentsensoren

Umweltsituation

Inzwischen hat sich der Einsatzbereich dieser Drehmomentmesstechnik von Pedelecs und E-Bikes auf S-Pedelecs, Lastenräder, Special Need Bikes und weitere Elektrofahrräder ausgeweitet. Damit waren für unser Unternehmen aufgrund der großen Nachfrage nach diesen Fahrzeugen steigende Stückzahlen, beginnend mit 50.000 im Jahr 2018, ansteigend auf bis zu 200.000 Messsystemen in den folgenden Jahren zu erwarten. Die Anwendung des zuvor genannten Magnetisierungsverfahrens würde bei den genannten Stückzahlen bereits kurz nach Anlauf der Fertigung zu einem Energieaufwand von > 100 [MWh/a] mit steigender Tendenz führen. Neben der Umweltbelastung würde der hohe Energieverbrauch auch einen beachtlichen Kostenfaktor bedeuten.

Zielsetzung

Ziel des Vorhabens war es deshalb ein Verfahren zu entwickeln, mit dem die zur Drehmomentmessung erforderliche Magnetisierung der Wellen für die Tretlager von Pedelecs, E-Bikes und deren Weiterentwicklungen in einem Arbeitsschritt erfolgt, um damit den Verbrauch elektrischer Energie um bis zu 70% zu reduzieren. Dies soll durch ein gesteuertes, einstufiges Magnetisierungsverfahren erreicht werden. Bei den geplanten Stückzahlen sollte dadurch eine Einsparung von bis zu 50 MWh/a mit steigender Tendenz je nach Produktionslinie erreicht werden.

Aufgabenstellung

Unter den Metallen in Reinform besitzen Eisen, Nickel und Cobalt bei Raumtemperatur die besten ferromagnetischen Eigenschaften. Tretlagerwellen aus Edelstählen mit entsprechenden Legierungsanteilen waren deshalb zu bevorzugen. Das Lösungskonzept sah vor, für jede Charge an Tretlagerwellen einmalig an einem Prüfling den zur Magnetisierung erforderlichen Strom zu messen. Dies ist erforderlich, weil die magnetischen Eigenschaften der verwendeten Stähle je nach Legierung und Vorbehandlung von Lieferung zu Lieferung stark differieren können. Hinzu kommt der Zustand der Oberflächen, der den Kontaktwiderstand und damit den Magnetisierungsstrom stark beeinflusst. Um diese Differenzen zu eliminieren sollte jeder Prüfling einer Charge mittels unlösbarer Kontakte (Löt-

oder Schweißverbindung) mit der Stromquelle verbunden werden. Die gemessene Stromstärke stellte dann den Sollwert dar, der in der Serienfertigung an jeder Welle einer Charge zur Magnetisierung erreicht werden musste.

Angesichts der zu erwartenden Stückzahlen sollten die einzelnen Arbeitsgänge von der Kontaktierung über die Messtechnik bis zur Steuerung der Kondensatorbank weitgehend automatisiert werden, was die Entwicklung entsprechender Einrichtungen sowie der Steuerungs-Algorithmen erforderte.

3. Hauptteil

3.1 Darstellung der einzelnen Arbeitsschritte, der angewandten Methoden und der erzielten Ergebnisse

3.1.1 Darstellung der einzelnen Arbeitsschritte

Zu Beginn des Vorhabens wurde der den folgenden Ausführungen zugrunde liegende Arbeitsplan aufgestellt. Diese Planung konnte im Wesentlichen eingehalten werden.

AP 1 Entwicklungsplanung

Zunächst wurden die Eigenschaften der verschiedenen Edelstähle, die für die Fertigung von Fahrrad-Kurbelwellen in Frage kommen, ermittelt und hinsichtlich ihrer magnetischen Kennwerte beurteilt.

AP 2 Untersuchung der magnetischen Eigenschaften

Mit den ausgewählten ferromagnetischen Werkstoffen für die Kurbelwellen wurden einige Versuche zur Magnetisierung bis zur Remanenz mit angelöteten oder verschweißten Kontakten vorgenommen. Die entsprechenden, spezifischen, elektrischen Leistungsdaten wurden den betreffenden Edelstählen zugeordnet. Es ergaben sich wichtige Messergebnisse, die insbesondere das magnetische Verhalten bei elektrischen Impulsvorgängen betrafen.

AP 3 Entwicklung spezifischer Kontaktschalen zur Kontaktierung der Kurbelwellen

Um möglichst gleichmäßige Übergangswiderstände zu erzielen, wurden spezielle Kontaktschalen entwickelt, die sich automatisch mit einem definierten Kontaktdruck mittels Feder- oder Luftdrucks an die Prüflinge anlegen lassen. Für die Fertigung spezieller Kontaktschalen zur verlustfreien Kontaktierung wurde ein Konzept erarbeitet und erprobt.

AP 4 Entwicklung der Teilezuführung und der automatischen Kontaktierung

Zur Produktion größerer Stückzahlen müssen die Kurbelwellen vereinzelt und in eine Position gebracht werden, in der die Kontaktschalen beidseitig mit konstantem Druck (federbelastet oder pneumatisch) angelegt werden können. Zunächst wurde eine Studie erarbeitet zur Verwendung von Pick and Place - Robotern für die automatische Zufuhr von Kontaktschalen einschließlich eines Kommunikationsmoduls.

AP 5 Entwicklung der Messtechnik zur Messung der Übergangswiderstände (Kontaktwiderstände)

Die Übergangswiderstände müssen automatisch gemessen, gespeichert und mit den unter AP2 gemessenen Werten verglichen werden. Daraus ergibt sich ein Faktor, der die Kontaktwiderstände berücksichtigt, der zunächst händisch eingestellt, später an die Software der Steuerung weitergereicht wird. Die Kontakte zwischen Widerstandsmessgerät und den Kontaktschalen müssen in der Serie konstant bleiben und wurden deshalb mittels Halbleiter geschaltet. Die Ergebnisse aus AP1 wurden realisiert, die Hardware wurde getestet

AP 6 Entwicklung der Spannungssteuerung für den benötigten Stromfluss

Es wurde eine Steuerung entwickelt, die die jeweils ermittelte Ladespannung der Kondensatorbank einstellt. Die Steuerung erfolgt unter Berücksichtigung der Ladekurve mittels Halbleiterelementen, die eine Gleichspannungsquelle entsprechend dem zuvor ermittelten Faktor steuern. Es wurde eine Mos-Fet-Bank zur Schaltung der Magnetisierungsströme entwickelt.

MosFet = Metall-Oxid-Halbleiter-Feldeffekttransistor (englisch metal-oxide-semiconductor field-effect transistor, MOSFET auch MOS-FET, selten MOST) gehört zu den Feldeffekttransistoren zum Schalten hoher Ströme.

AP 7 Entwicklung einer Kondensatorbank mit variabler Ladespannung

Es musste eine Kondensatorbank mit variabler Ladespannung entwickelt werden, die schnell aufgeladen werden kann und zwar auf Spannungen, die um die zuvor ermittelten Faktoren zur Berücksichtigung der Kontaktwiderstände differieren, sodass jeweils nur eine Entladung erforderlich ist, um die gewünschte Remanenz der Kurbelwelle zu erreichen.

Die in AP 5 und 6 entwickelte Steuerungs- und Messtechnik wird genutzt um die Ladespannungen der Kondensatorbank zu bestimmen und einzustellen. Die Auswahl der Kondensatoren erfolgte nach dem Parameter eines möglichst geringen Innenwiderstands hoher Energiedicht bzw. hoher Kapazität und der geforderten Spannungsfestigkeit. Zur Entladung der Kondensatoren wird eine Reihe parallel geschalteter Mos-Fets eingesetzt. Dazu wurde ein entsprechend leistungsfähig ausgelegtes Gate –Treiber entwickelt.

AP 8 Entwicklung der Software zur Steuerung der Kondensatorbank

Die Arbeitsgänge 4, 5, 6 und 7 müssen automatisch ablaufen. Dazu war der Einsatz einer geeigneten SPS erforderlich, Für den beschriebenen Ablauf musste eine entsprechende Software entwickelt werden. Danach wurden Versuche durchgeführt, Fehler beseitigt und die Software am Gerät in Betrieb genommen.

Die Steuerung der entwickelten Komponenten wurde durch eine Embedded – Plattform realisiert, das heißt der Prozessor wurde in das technische System eingebunden um die die Regelfunktion zu übernehmen. Hierzu wurde ein Micro Controller mit ARM – Kern aus der STM32 F3 –Familie ausgewählt. Die ARM-

ICs wurden vom britischen Computerunternehmen Acorn entwickelt. Diese digitalen Prozessoren sind durch ihren Aufbau und ihre Peripheriekomponenten besonders für regelungstechnische Aufgaben geeignet. Alle STM32F3 Chips kann man mit 2,0 bis 3,6 Volt betreiben, die USB-Schnittstelle läuft nur mit 3,3 V. Für die Software-Entwicklung stehen verschiedene Entwicklungsumgebungen, vor allem für Windows, zur Verfügung.

AP 9 Erprobung der Magnetisierungseinrichtung

Die einzelnen Komponenten wurden zu einer funktionsfähigen Einheit zusammenmontiert, um den gewünschten Ablauf zunächst mechanisch zu erproben. Die Erprobung fand an einer eigens für den Hochstrompuls entwickelten Messvorrichtung statt. Hierzu wurde ein entsprechend ausgelegter Hochstrom Shunt-Widerstand mit geeigneten Kontakten der Fa. Harting am Gerät verbunden. Hieraus ergibt sich der Vorteil einer reproduzierbaren Messung bei wiederholbaren Bedingungen.

Die während dem Stromfluss abfallende Spannung wird durch ein parallel geschaltetes Oszilloskop aufgezeichnet. Hierbei kann die Charakteristik des Strompulses mit hoher zeitlicher Auflösung, erfasst und untersucht werden, wie in der folgenden Abbildung 4 dargestellt.

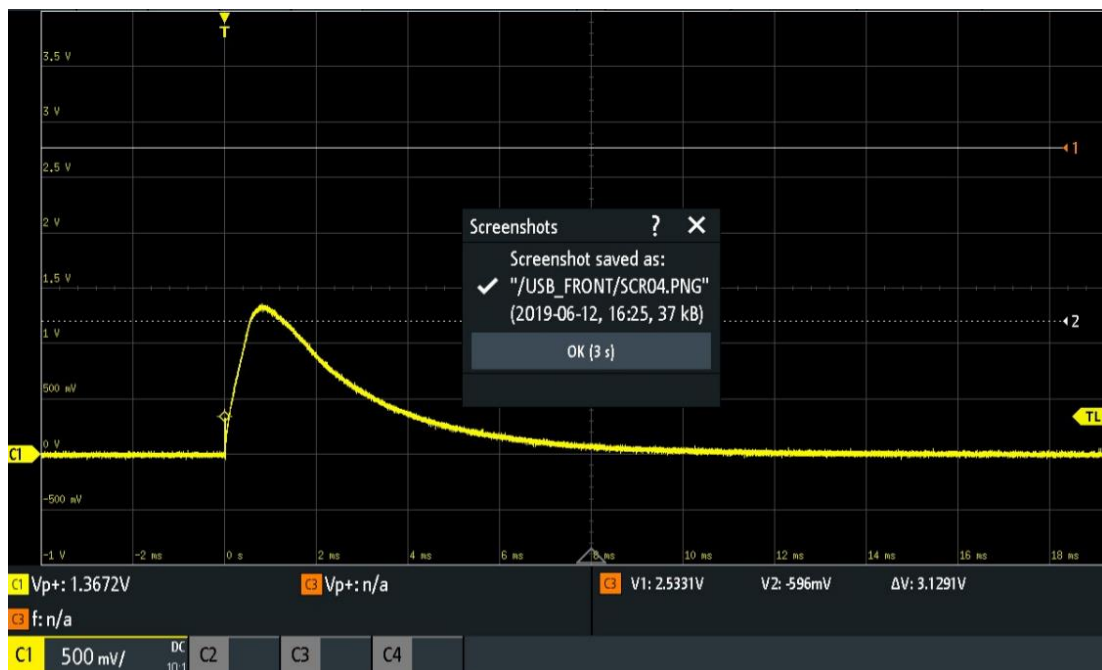


Abbildung 4: Zeitlicher Verlauf eines Stromimpulses bei der Kondensatorentladung zur Magnetisierung

Die Teilung der Ordinate beträgt 500 [mV], der Abszisse 2 [ms]. Daraus kann die maximale Entladespannung auf 1,3 [V] und die Anstiegszeit auf etwa 0,8 [ms] abgeschätzt werden.

AP 10 Tests, Fehlerbeseitigung und Verbesserungen der Magnetisierungseinrichtung

In diesem Arbeitspaket sollte primär die Steuerung, die Qualität der Software und die erreichte Magnetisierung getestet werden. Dazu wurde jeweils eine bestimmte Anzahl an Wellen aus verschiedenen Chargen und Materialien getestet, um die erforderliche Magnetisierung nachzuweisen.

Zur Erprobung wurden spezielle Testskripte angefertigt, die in der Programmiersprache Python* verfasst wurden. Mit diesen Skripten konnten Dauertests und bestimmte kritische Testfälle automatisiert durchgeführt und die Ergebnisse erfasst werden. Folgende Prüfungen wurden nach dieser Vorgehensweise durchgeführt:

- Prüfung von Temperaturdrift im Dauerbetrieb,
- Übertemperaturabschaltung im Dauerbetrieb,
- Erkennung von Fehlerfällen im Betrieb (Selbstdiagnose),
- Prüfung der Ergebnisreproduzierbarkeit im Dauerbetrieb.

Hierdurch konnte die Robustheit des Systems unter simulierten Realbedingungen nachgewiesen werden. Die erzielten Ergebnisse konnten somit positiv bewertet werden.

*Python“ ist eine höhere Programmiersprache, auch als Skriptsprache bezeichnet, d.h. ein erstelltes Programm wird interpretiert, wenn es gestartet wird.

AP 11 Nachweis der Energieeinsparung

Es war damit zu rechnen, dass bei der Erprobung noch Fehler und Verbesserungsmöglichkeiten entdeckt würden, die zu beseitigen wären. Danach ist der Nachweis der Energieeinsparung der entwickelten Magnetisierungsmethode im Vergleich zur bisherigen Magnetisierung zu führen. Diese beruhte bisher, wie beschrieben darauf, dass jede einzelne Welle solange mit Stromimpulsen beaufschlagt wurde, bis die gewünschte Remanenz erreicht wurde.

Die geschilderten Entwicklungsschritte einschließlich der Verbesserung der Mess- und Regelungstechnik führten zu einer deutlichen Reduzierung der erforderlichen elektrischen Energie. Die Anzahl der notwendigen Strompulse zum Erreichen einer stabilen Magnetisierung konnte von bisher sieben Ladevorgängen auf drei reduziert werden. Dies wurde vor allem erreicht durch die exaktere Ermittlung der notwendigen Ladespannung sowie die präzisere Aufladung der Kondensatoren auf die zuvor berechnete Spannung. Damit kann der vorgegebene Zielstrom in einer geringeren Anzahl an Iterationsstufen erreicht werden (Abbildung 5).

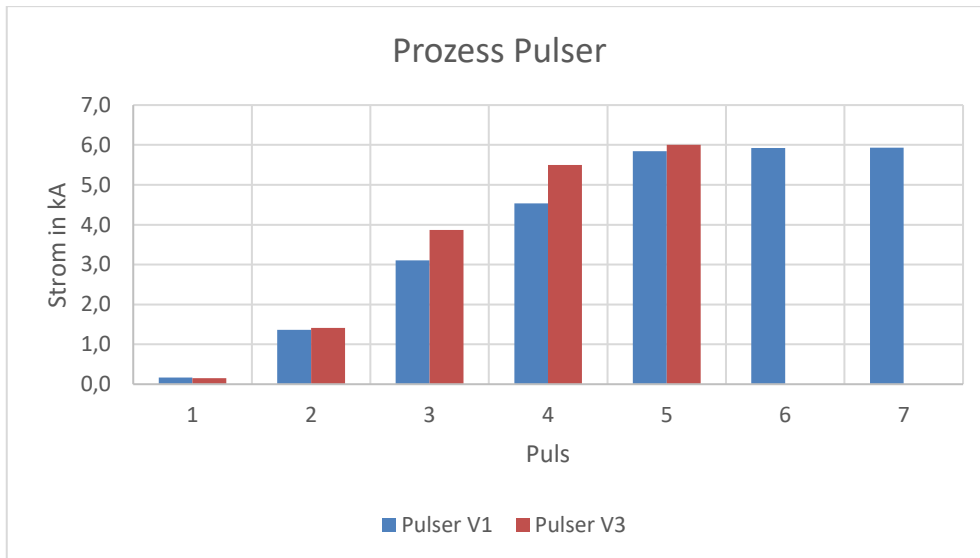


Abbildung 5: Kondensatorentladungen zur erforderlichen Magnetisierung

AP 12 Vergrößerung (Scala up) der Magnetisierungseinrichtung für größere Wellendurchmesser

Aufgrund des Nachweises der Energieeinsparung war zu prüfen, ob die entwickelte Magnetisierungsmethode auch für Wellen mit größerem Durchmesser übernommen werden kann, d.h. es musste ermittelt werden, bis zu welchem Wellendurchmesser eine einmalige Kondensatorladung zur Magnetisierung ausreicht und welchen Einfluss der Skin-Effekt ausübt.

Für die bisherigen Anwendungen bei NCTE sind Stromstärken von 15 [kA] ausreichend. Die Geräte wurden deshalb für Strompulse bis zu diesem Wert ausgelegt. Im Arbeitspaket 10 wurde die Eignung des Einsatzes für diese Stromstärken bestätigt. Zur Erweiterung auf höhere Ströme wurde eine Schnittstelle zum Parallelschalten mehrerer baugleicher Geräte vorgesehen.

AP 13 Dokumentation; Verbreitung der Ergebnisse

Das Vorhaben wurde mit der Entwicklung von Schutzeinrichtungen und Bedienungshinweisen abgeschlossen. Berechnungen zur Geräteauslegung, dem Design sowie alle Prüfungen und Ergebnisse wurden bei NCTE entsprechend den Firmenstandards dokumentiert.

Die NCTE AG wird die Fortschritte in ihrer Produktionstechnik auf Messen präsentieren, wie z.B. der Messtechnik-Messe SENSOR+TEST, der Leitmesse der Fahrradindustrie EUROBIKE oder auf Motorsportmessen.

Die weitere Verbreitung der Entwicklungsergebnisse erfolgt über die direkte Ansprache von Kunden, Ausstellungen sowie über unsere informative Internetseite <https://ncte.com/e-bikes>

3.1.2 Darstellung der angewandten Methoden

Zur präzisen Bestimmung des elektrischen Widerstandes (Kontakt-Übergangswiderstand zur Welle) wird ein erster Puls bei einer geringen Kondensatorspannung abgegeben. Durch den dabei fließenden Strom und die zuvor eingestellte Spannung wird der elektrische Widerstand R der Messwelle bestimmt: $R = U / I$. Dieses Ergebnis wird zur Berechnung der Kondensatorspannung für den nächst höheren Puls herangezogen: $U = R * I$

Somit wird iterativ mit steigenden Pulsstrom der elektrische Widerstand der Welle immer genauer bestimmt. Damit kann die für den Pulsstrom nötige Kondensatorspannung präzise ermittelt werden.

Wird hingegen der elektrische Widerstand der zu magnetisierenden Messwelle nur ungenau bestimmt, so kann der optimale Pulsstrom nicht erreicht werden. Ist der Pulsstrom zu hoch wird unnötig Energie verbraucht. Ist der Pulsstrom zu gering leidet die Qualität der Magnetisierung.

Beide Problemfälle konnten durch die Verbesserung der Strommessung und eine Optimierung der Pulsfolge abgestellt werden.

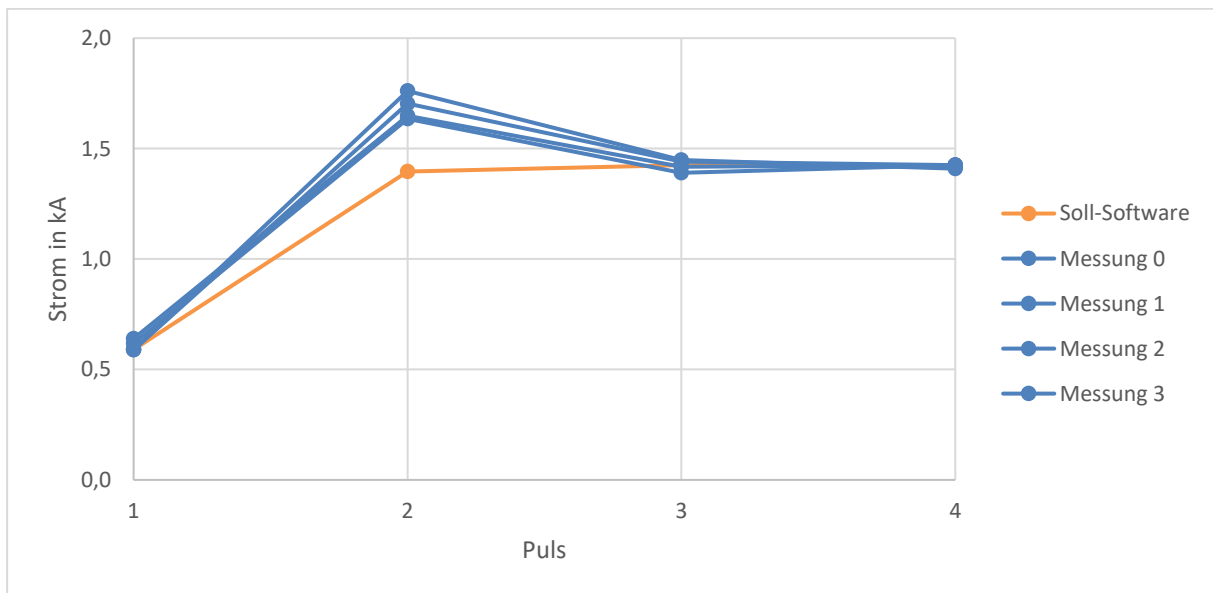


Abbildung 6: Pulsvorgang zur Magnetisierung, aktueller Stand – Wellentyp A

Der von der Software vorgegebene Sollstrom ist in orange dargestellt. In Blau sind verschiedene Messreihen gezeichnet. Man erkennt, dass zu hohe Pulsströme abgegeben und dadurch unnötig Energie (ca. 15%) verbraucht wird.

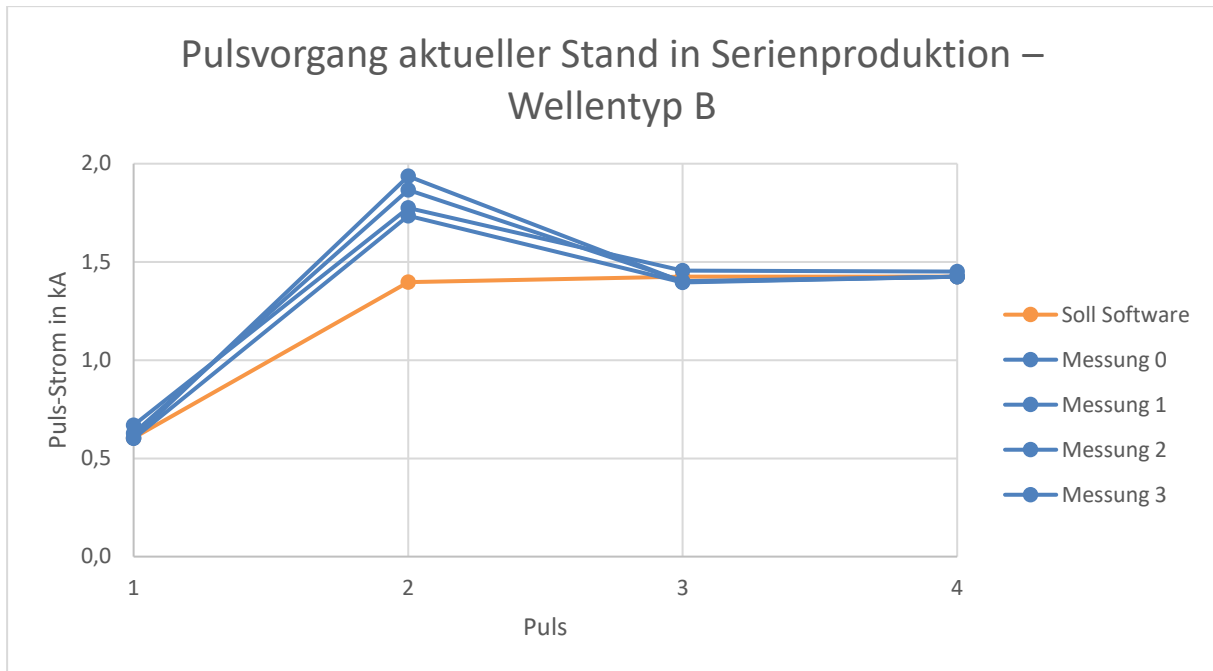


Abbildung 7: Pulsvorgang, aktueller Stand in der Serienproduktion bei Wellentyp B

Bei Vergleich mit dem vorherigen Diagramm (Abbildung 6) erkennt man, dass die Überhöhung des Stromes auch vom Wellentyp, d.h. von dessen Querschnitt und der Stahllegierung abhängt.

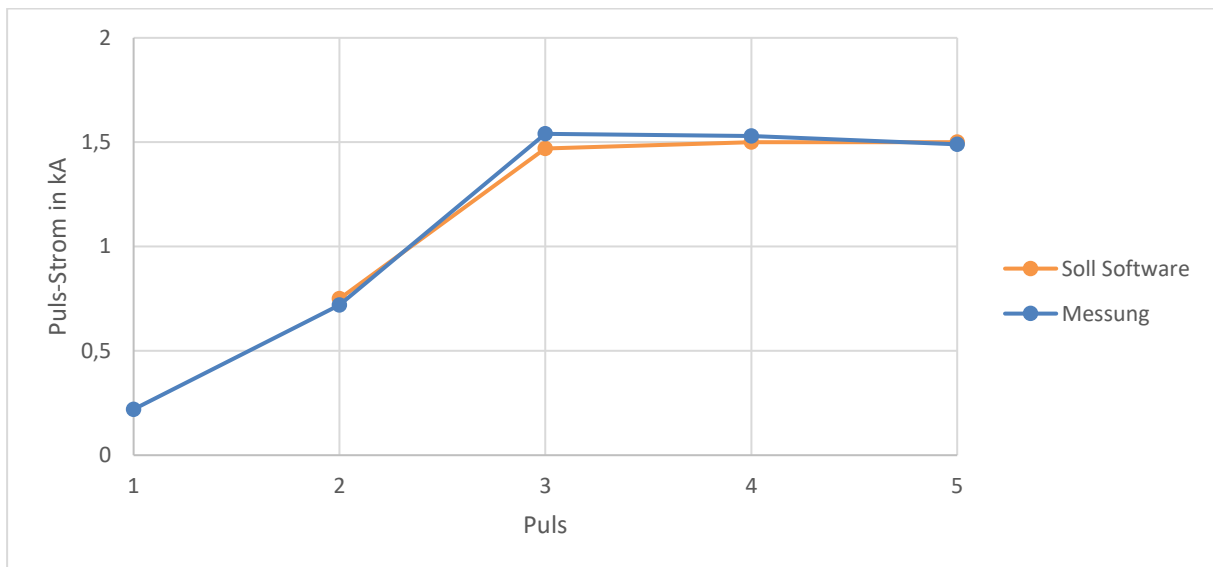


Abbildung 8: Pulsvorgang mit optimierter Widerstandsbestimmung

Durch die Verbesserungen bei der Bestimmung des elektrischen Widerstandes der Messwelle können die Strompulse deutlich genauer entsprechend der Vorgabe gesteuert werden.

Durch Optimierung des Stromanstiegs in der Pulsfolge konnte der Pulsstrom exakt auf den Vorgabewert eingestellt (Abbildung 9) und damit eine Energieeinsparung von etwa 15% erreicht werden.

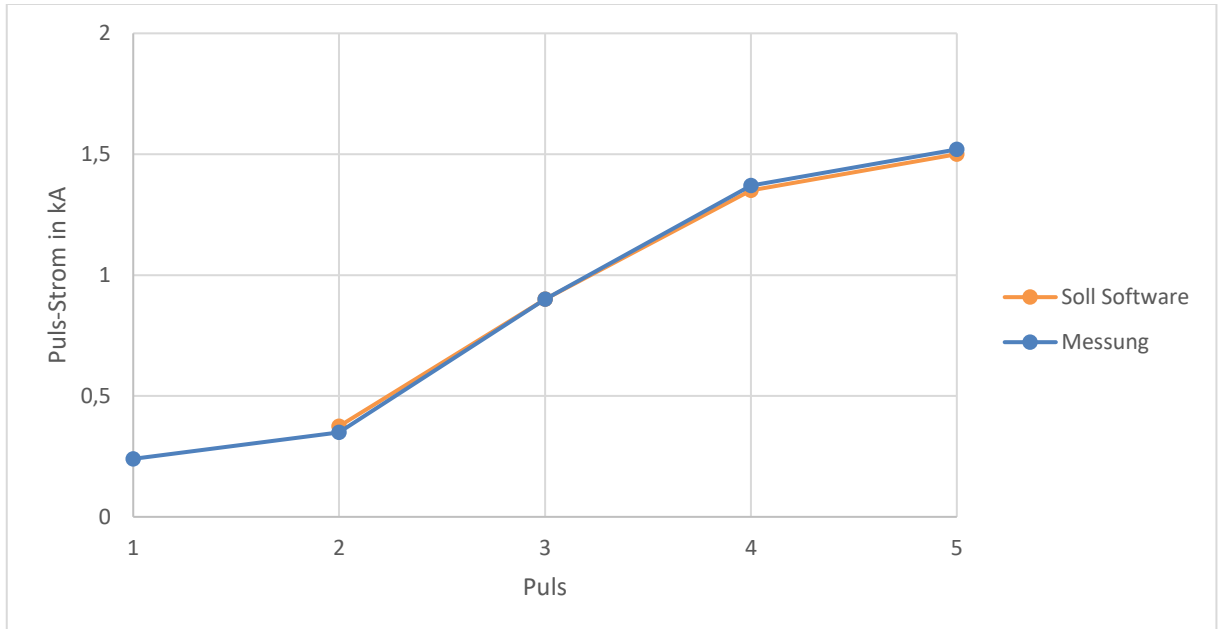


Abbildung 9: Pulsvorgang mit optimierter Widerstandsbestimmung und optimierter Sollstromrampe

Als weitere Möglichkeit zur Energieeinsparung während des Pulsvorgangs wurde das Abschalten der abklingenden Strompulse erkannt, nachdem diese jeweils ihr Maximum erreicht haben. In der bisherigen Implementierung wird bei jedem Pulsvorgang die Kondensatorbank komplett entladen (Abbildung 4 und 10) und dann für den nächsten Puls neu aufgeladen, wie in Abbildung 11 dargestellt.

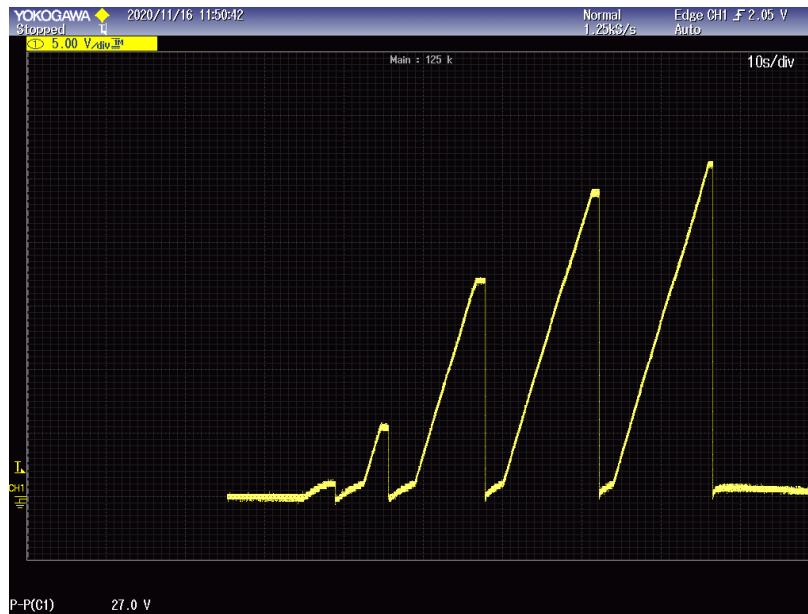


Abbildung 10: Verlauf der Kondensatorspannung bei einer Magnetisierung ohne vorzeitiges Abschalten des Pulsstromes

Die vollständige Entladung der Kondensatorbank ist jedoch nicht erforderlich, da der abklingende Strom keinen Einfluss auf die erreichte magnetische Feldstärke hat. Für die Qualität der Magnetisierung ist lediglich das erreichte Pulsmaximum relevant. Das vollständige Entladen der Kondensatoren, wie in Abbildung 10 dargestellt, kann vermieden werden, indem der Stromfluss vorzeitig unterbrochen wird. Wir entwickelten deshalb eine entsprechende Halbleiter-Schaltung, um den Stromfluss kurz nachdem die maximale Stromstärke erreicht wurde, zu unterbrechen, wie in der folgenden Abbildung dargestellt.

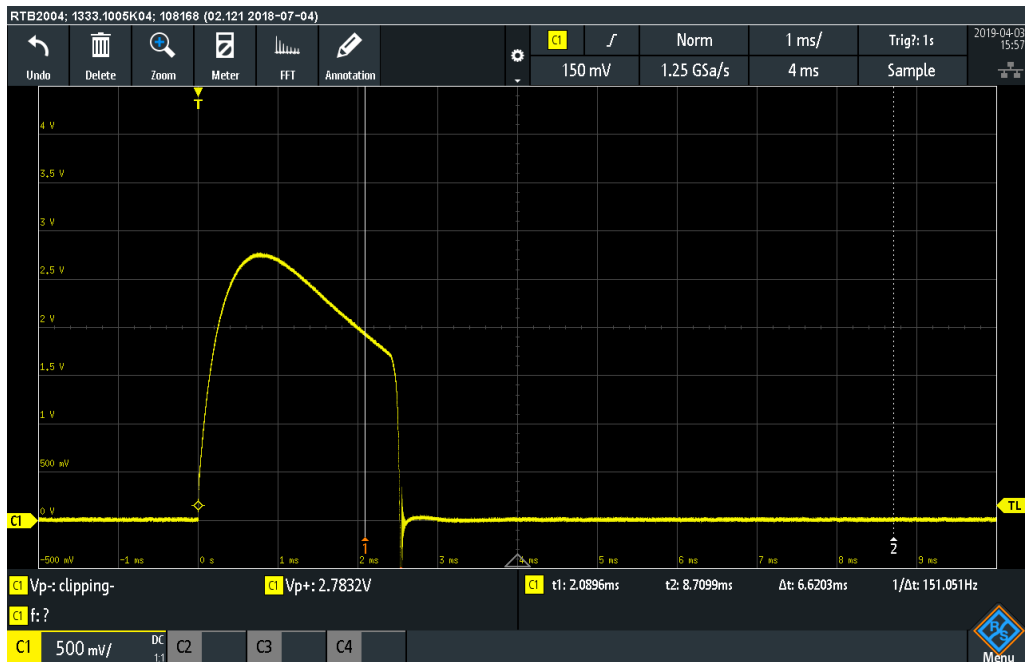


Abbildung 11: Stromverlauf eines Strom-Pulses, der kurz nach Erreichen des Maximums abgeschaltet wird, um Energie zu sparen:



Abbildung 12: Verlauf der Kondensatorspannung bei einer Magnetisierung mit verkürzten Pulsen

Die Energieeinsparung durch diese Maßnahme kann durch eine Dreiecksfläche berechnet werden, wobei die Hypotenuse durch die Verbindung der Abschaltpunkte bestimmt wird, während die Katheten durch die Nullspannung und die Senkrechte vom letzten Abschaltpunkt gebildet werden, entsprechend der folgenden Abbildung.

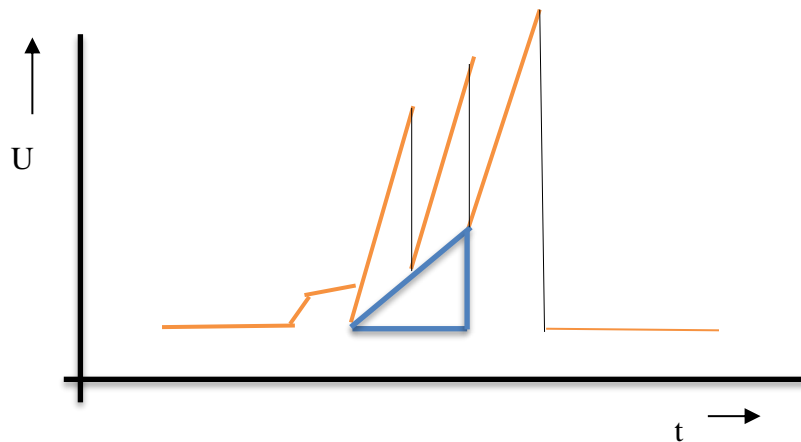


Abbildung 13: Spannungsverlauf schematisch bei verkürzten Pulsen; das Dreieck entspricht der Energieeinsparung je Magnetisierung einer Welle

Genau berechnen lässt sich diese Energieeinsparung wie folgt: Da die Kapazität C der Kondensatorbank bekannt ist, kann man mit der Gleichung $E = \frac{1}{2} C \cdot U^2$ die im Kondensator gespeicherte Energie genau berechnen. Misst man die Kondensatorspannung U vor und nach einem Puls, so erhält man die vor dem Puls im Kondensator gespeicherte Energie sowie die restliche Energie, die nach dem Abschalten noch gespeichert ist. Aus der Differenz lässt sich die für den Puls abgegebene Energie bzw. die durch das Abschalten eingesparte Energie bestimmen.

3.1.3 Darstellung der tatsächlich erzielten Ergebnisse

Durch Optimierung des Stromanstiegs in der Pulsfolge konnte der Pulsstrom exakt auf den Vorgabewert eingestellt (Abbildung 9) und damit eine Energieeinsparung von etwa 15% erreicht werden.

Eine weitere Energieeinsparung wurde durch die erwähnte Abschaltung des Entladestroms nach Erreichen des maximalen Entladestroms erzielt (Abbildungen 12 und 13). Dadurch wird die Energie zur Ladung der Kondensatorbatterie weiter reduziert, was allerdings messtechnisch schwer zu erfassen ist und daher ausgehend von Abbildung 13 auf mindestens 10 bis 15% geschätzt wird.

Insgesamt ergibt sich somit eine Energieeinsparung bei der Magnetisierung der Wellen durch das FuE-Projekt von etwa 30 %

3.2 Diskussion der Ergebnisse

Bei den Magnetisierungsversuchen wurden als Wellenmaterial bevorzugt die Stahlsorten eingesetzt, die von den betreffenden Kunden in ihren Produkten, wie z. B. Tretlagern für E-Bikes und Pedelecs, verwendet werden. Als geeignete Sensorstähle erwiesen sich beispielsweise die Werkstoffe 45NiCrMo16 (1.2767), 15NiCr13 (1.5752), X20Cr13 (1.4021) oder S155/300M.

Der nickellegierte Kaltarbeitsstahl 45NiCrMo16 (1,2767) weist eine hohe Zähigkeit, sehr gute Durchhärbarkeit sowie eine hohe Schlagzähigkeit und Druckfestigkeit auf. Die Arbeitshärte beträgt 52-55 HRC. Der Stahl ist gut polier- und erodierbar.

Der Werkstoff 15NiCr13 (1.5752) wird hauptsächlich für hochbeanspruchte Teile im Werkzeug- und Maschinenbau, Flugzeugbau und für Bauteile im Automobil- und Getriebebau verwendet. Es handelt sich um einen Einsatzstahl. Beim Einsatzstahl und Nitrierstahl wird nach der Bearbeitung die Randschicht gehärtet. Im Kern bleibt die Zähigkeit erhalten, wodurch die Stähle verschleißfest und zäh werden.

X20Cr13 (1.4021) ist ein nichtrostender, martensitischer Stahl. Er besitzt durch seinen hohen Chromgehalt von 12% bis 14% eine gute Korrosionsbeständigkeit, die durch Schleifen und Polieren der Oberfläche noch verbessert werden kann.

300M/S155 ist ein hochleistungsfähiger, vakuumgeschmolzener Chrom-Nickelstahl mit einem Molybdän-Gehalt zwischen 0,3 und 0,6%, der im normalisierten und vergüteten/enthärteten Zustand bereitgestellt wird, um die Bearbeitbarkeit vor der endgültigen Wärmebehandlung zu verbessern. Es handelt sich um eine durchhärtende Legierung, die Festigkeit, Beständigkeit gegenüber Ermüdung und gute Dehnbarkeit bietet. Das Material wird deshalb bevorzugt in der Luft- und Raumfahrtindustrie, wie z.B. bei Fahrgestellkomponenten, Getrieben oder Wellen, eingesetzt.

Die magnetischen Eigenschaften der Stähle sind zudem von der thermischen und mechanischen Vorbehandlung abhängig, wie etwa von der Wärmebehandlung und den Fertigungsverfahren. Jede Materialcharge wird daher von uns gezielt vorab für die messtechnische Eignung und die resultierende Genauigkeit begutachtet und getestet.

Ergebnisse hinsichtlich Kontaktierung, Kondensatorentladungen

Durch die Verbesserung der Strom- und Spannungsmessung während eines Pulses kann der elektrische Widerstand der zu magnetisierenden Welle präzise bestimmt werden. Diese Information wird genutzt, um die notwendige Ladespannung für den nächsthöheren Strompuls bestimmen zu können.

Durch Optimierung des Stromanstieges von einem Puls auf den nächsten kann ein „Überschießen“ und somit auch der Energiebedarf für einen Magnetisierungsvorgang gesenkt werden.

3.3 Ausführliche ökologische, technologische und ökonomische Bewertung der Vorhabensergebnisse

3.3.1 Ökologische Bewertung

Bei der ökologischen Bewertung sind verschiedene Punkte von Bedeutung wie folgt:

- die Beteiligung unseres Unternehmens am erwünschten Trend zum Zweiradverkehr mittels kostenoptimierter Produkte.
- die Einsparung elektrischer Energie in Produktionsprozessen ist vor allem aufgrund der Reduzierung des CO₂-Ausstoßes relevant. Laut „Strom-Report 2020“ entsteht in Deutschland je MWh ein Ausstoß von 401 [t] CO₂. Insofern ist durch das FuE-Vorhaben eine jährliche CO₂-Reduzierung in der Größenordnung von 10 000 [t] CO₂ zu erwarten.
- Ein weiterer wichtiger Gesichtspunkt ist darin zu sehen, dass elektrische Energie aufgrund der Umstellung auf die ökologische Erzeugung sowie die zunehmende Nutzung elektrisch angetriebener Fahrzeuge in Zukunft nicht mehr wie bisher in scheinbar unbegrenzter Menge zur Verfügung stehen wird. Maßnahmen zur Energieeinsparung sind deshalb auch aus diesem Grund geboten.

3.3.2 Technologische Bewertung

Zu Beginn der FuE-Arbeiten gingen wir davon aus, dass es möglich sein müsste, die betreffenden Wellen (Sensorwellen) mit einem Stromimpuls, dessen Stärke proportional zu seinem Durchmesser zu bemessen wäre, ausreichend radial zu magnetisieren. Tatsächlich sind aber auch nach Abschluss dieser Entwicklung noch 3 bis 4 Stromimpulse bis zur Erreichung der benötigten Feldstärke erforderlich. Dies hat unseres Erachtens folgenden Grund:

Nach E. Weiss sind die einzelnen Teilchen (Atome) in ferromagnetischen Stoffen als Elementarmagnete in der Sättigung und bereichsweise (Weiß'sche Bezirke) geordnet (Längenskalen zehn Nanometer bis wenige Mikrometer lt. Wikipedia), jedoch so, dass sich die magnetischen Wirkungen gegenseitig aufheben. Legt man nun ein äußeres Magnetfeld an, so werden diese Weißschen Bezirke ausgerichtet. Dies erfolgt jedoch nicht schlagartig, sondern proportional zu einem ansteigenden äußeren Magnetfeld ändern immer mehr dieser Bezirke ihre Ausrichtung, bis die maximale Ausrichtung, also die magnetische Sättigung, erreicht ist.

Aus Untersuchungen zur magnetischen Datenspeicherung (Festplatten) wurde bekannt, dass die Magnetisierung selbst dünnster Magnetschichten deshalb eine gewisse Zeit im µs-Bereich benötigt. Großvolumige ferromagnetische Werkstoffe, wie auch die von uns zu bearbeiteten Wellen, die vor einer entsprechenden Verarbeitung entmagnetisiert werden müssen, benötigen dazu deutlich mehr Zeit, da die Neukurve zunächst absteigend durchfahren werden muss (Abbildung 14).

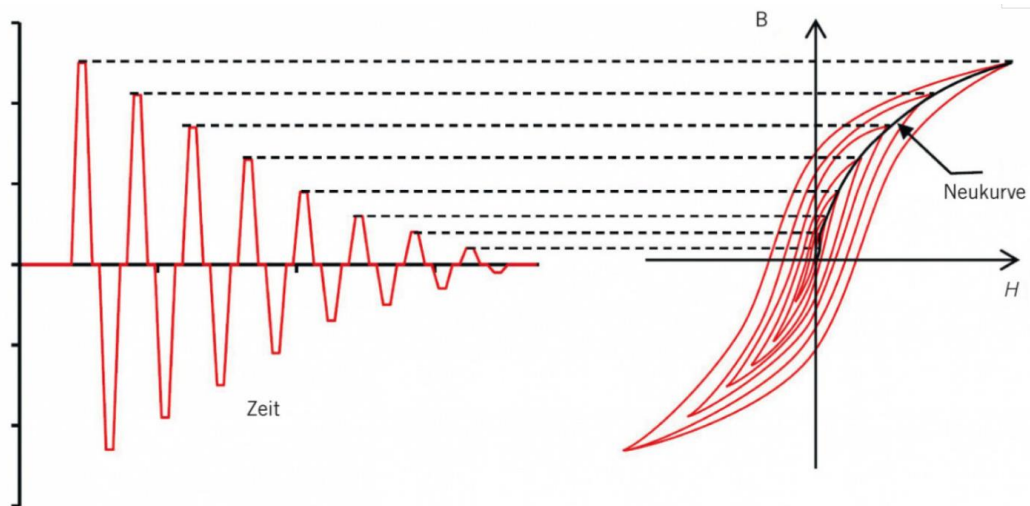


Abbildung aus „Elektro.net“ 2018

Abbildung 14: Entmagnetisierung durch Gleichfeld-Umpolung

Die Abbildung 14 ist insofern auch von Interesse da zur erneuten, definierten Magnetisierung im FuE-Projekt der gleiche Prozess, jedoch mit umgekehrtem Vorzeichen, durchfahren werden muss. Allerdings muss bei der in Rede stehenden Magnetisierung nicht das gesamte Stahlvolumen magnetisiert werden. Für den Messeffekt genügt die Magnetisierung einer Oberflächenschicht über eine definierte Länge, sodass sich die Eindringtiefe der Magnetisierung, die bei sehr kurzen Stromimpulsen aufgrund des Skin效ekts problematisch ist, weniger störend bemerkbar machen sollte.

Aufgrund unserer Entwicklung sind wir jetzt in der Lage, mittels einer Widerstandsmessung und des jeweils vorliegenden Wellendurchmessers eine optimale Kondensatorladung zur Magnetisierung bereitzustellen, die drei bis vier Mal über die betreffende Welle entladen wird. Diese Methode führt im Zusammenwirken mit der Abschaltung des abklingenden Stromes (Abbildung 12) zu der erwähnten Energieeinsparung von etwa 30%.

3.3.3 Ökonomische Bewertung

Die Bewertung einer erheblichen Einsparung elektrischer Energie fällt angesichts der extrem hohen Stromkosten in Deutschland eindeutig aus: Jede Kosteneinsparung im Produktionsbereich in der Größenordnung von 3 000,- € je MWh und Jahr setzt finanzielle Mittel frei, die dringend für Investitionen und FuE-Projekte benötigt werden.

3.4 Darlegung der Maßnahmen zur Verbreitung der Vorhabensergebnisse

Bei der Verbreitung der Vorhabensergebnisse ist zu beachten, dass die durchgeführte Entwicklung eine interne Produktionsmethode betrifft, deren ökologischen, technischen und wirtschaftlichen Auswirkungen zunächst dem Unternehmen von Vorteil sein werden.

Gleichwohl werden wir diese Vorhabensergebnisse nutzen, um uns unserem Kundenkreis verstärkt als umweltorientiertes, modernes Unternehmen zu beweisen. Zur Bekräftigung dieses Anspruchs werden wir die angewandten Methoden und die sich daraus ergebende Einsparung an Produktionsenergie in unsere Produktbeschreibungen aufnehmen und bei Ausstellungen entsprechende Hinweise geben. Auf größeres Interesse rechnen wir vor allem bei unseren Kunden aus der Zweirad-Industrie, die schon aufgrund ihres Angebots an umweltfreundlichen Produkten auch an Zulieferungen mit gleichem Anspruch interessiert sein werden.

4.0 Fazit

Die Arbeiten und Überlegungen zur Magnetisierung von Stahlwellen mittels kurzer Stromimpulse aus einer Kondensatorbatterie haben zu einer Energieeinsparung von etwa 30% geführt. Allerdings ist es möglich, dass ein einziger Stromstoß – je nach Übergangswiderstand - nicht ausreicht, um die erforderliche Feldstärke zu erzielen, d.h. die Menge der einzelnen Weiß'schen Bezirke, auch als Domänen bezeichnet, in die gewünschte Richtung, im vorliegenden Fall radial, zu orientieren. Erst bei größeren Feldstärken klappen die magnetischen Momente ganzer Weiß'scher Bezirke auf einmal um, ohne dass die Feldstärke erhöht wurde. Dadurch ändert sich dann das Magnetfeld des Werkstoffs sprunghaft, wie beabsichtigt (magnetischer Barkhausen-Effekt).

Der tatsächliche Grund warum wir mehrere Pulse benötigen ist der, dass wir über den jeweils vorherigen Puls aus Kondensatorspannung und geflossenem Strom den Widerstand der Welle bestimmen. Da der Widerstand von Welle zu Welle schwankt, muss dieser für jede Welle individuell neu bestimmt werden. Und für diese präzise Bestimmung werden mehrere Pulse mit steigender Stromstärke benötigt. Das entwickelte Gerät nähert sich also schrittweise an die notwendige Kondensatorspannung an.

Die Schwankungen des Widerstandes zwischen baugleichen Wellen hängen demnach hauptsächlich vom Übergangswiderstand zwischen Welle und Kontakt-Oberfläche ab. Er wird von der Oberflächenbeschaffenheit der Welle bestimmt. Würden alle Wellen gereinigt und geschliffen werden, wären die Schwankungen des Übergangswiderstand geringer und es müsste nicht jedes Mal die notwendige Kondensatorspannung neu bestimmt werden. Dann wäre es denkbar mit weniger oder gar mit einem einzigen Puls zu magnetisieren.

Weitere Maßnahmen zur Energieeinsparung wären somit eine sorgfältige Reinigung der Kontaktstellen an den Wellen einschließlich eines Feinschleif-Vorgangs zur weiteren Reduzierung der Kontaktwiderstände.

5.0 Literaturverzeichnis

- [1] Peter F. Brosch; Moderne Stromrichterantriebe
Vogel Buchverlag Würzburg; 2. Auflage. S. 50
- [2] Ulrich G.P. Freyer: Professionelle Stromversorgung
Franzis Verlag München
- [3] Tabellenbuch Elektrotechnik
Verlag Europa Lehrmittel; 42781 Haan-Gruiten
- [4] Innovationsreport der IDEA TV-Gesellschaft für kommunikative
Unternehmensbetreuung mbH
<https://www.innovations-report.de/fachgebiete/physik-astronomie/magnetisieren-braucht-mehr-zeit-entmagnetisieren-191301/>
- [5] Fachzeitschrift „Elektro.net“ Hütig Verlag vom 15.05.2018
<https://www.elektro.net/90767/entmagnetisieren-von-grossflaechigen-objekten/>
- [6] Strom-Report 2020
<https://strom-report.de/co2-deutscher-strommix/>