

Eine hochpräzise Wickelmaschine für dünne supraleitende Drähte

Ausgangslage

Die Herstellung von hochpräzisen supraleitenden Spulen für die Anwendung als „Interner supraleitender Polarisationsmagnet“ erfordert eine Wickleinrichtung (Wickelmaschine)¹ die einen in allen Schritten der Herstellung reproduzierbaren Prozess- bzw. Verfahrensablauf gewährleistet. Die Erfahrung mit der vorhandenen Wickelmaschine bei der Herstellung der ersten Prototypen der internen Spulen hat gezeigt, dass der herkömmliche Aufbau einer Wickelmaschine mit angetriebenem Wickler, mechanisch gekoppeltem Vorschub und mitlaufendem passiven Abwickler nicht ausreicht, um die erforderliche Präzision beim Wickeln des Drahtes im sogenannten Nasswickelverfahren prozesssicher zu gewährleisten. Die Verwendung der dünnen Supraleiter in orthozyklischen Wickelschemata erfordert daher eine Anpassung der Antriebskomponenten hin zu aktiven und unabhängigen Antrieben für Wickler, Vorschub und Abwickler. Besonders die Drahtführung und Zugspannungsregelung zwischen Abwickler und Wickler (Spulenkörper) galt es zu optimieren.

Neben der Genauigkeit der Drahtpositionierung in der Wicklung einer Spule ist die Funktion und der sichere Betrieb eines supraleitenden Magneten immer auch von der hohen Qualität der Verklebung der einzelnen Drähte im Windungspaket der Spule abhängig. Das Nasswickelverfahren mit geringviskosen Klebstoffen verlangt zwingend nach einem Aushärteverfahren, bei dem der rotierende Spulenkörper kontrolliert aufgeheizt und wieder abgekühlt wird. Es bietet sich also an, die beiden Prozessschritte wickeln und aushärten in einer „Aufspannung“ der Spule auf der Wickelmaschine nacheinander durchzuführen. Die Ausheizvorrichtung der vorhandenen Wickelmaschine bietet nur unzureichende Möglichkeiten die Temperatur auf dem Wickelkörper während des Aushärtevorgangs zu messen und muss dahingehend optimiert werden.

Die Anforderungen für die Optimierung des Herstellungsprozesses einer supraleitenden Spule wurden in einem Pflichtenheft zusammengetragen und mit den Entwicklungsmöglichkeiten der vorhandenen Wickelmaschine abgeglichen. Im Ergebnis zeigte sich, dass die vorhandene Wickelmaschine nur begrenzte technischen Entwicklungsmöglichkeiten bot, die technischen Verbesserungen umzusetzen. Umfangreiche Marktrecherchen und Kontakte mit Herstellern von Wickelmaschinen ergaben zudem, dass keine kommerzielle Maschine unseren Anforderungen gerecht wird. Daher wurde von Grund auf ein komplett neues System in unserer Arbeitsgruppe entworfen und aufgebaut. Der prinzipielle Aufbau der neuen Wickelmaschine folgt dem einer herkömmlichen Maschine, mit zentralem Support für die Aufnahme des Spindelstocks (Wickler), des Reitstocks zum Spannen des Wickelkörpers, einer Drahtführung und zusätzlich den Einrichtungen für den Aushärteprozess des Spulenklebers. Die wichtigsten Entwicklungsschritte und deren technische Umsetzung werden nachfolgend zusammengefasst.

Genereller Aufbau

Ausgangspunkt für die Überlegungen zu einer neuen Wickelmaschine war der Wunsch neben zylindersymmetrischen Spulen (Solenoiden, einfache Dipole, Helmholtzkonfigurationen) auch asymmetrische auf zylindrische Trägergeometrien platzierte Spulen („Race-track“ oder „tilted-coil“ Systeme) zu wickeln. Weiterhin galt und gilt die Anforderung bzw. Notwendigkeit, dass die dünnen supraleitenden Drähte (bis zu einem Maximaldurchmesser von 0.4 mm, typischer Weise aber zwischen 100 und 300 μm) im sogenannten Nasswickelverfahren auf den Wickelkörper (Spulenträger) aufzubringen ist. Im weiteren Prozessablauf soll die fertig gewickelte Spule resp. der verwendete Kleber auf der Wickelmaschine ausgehärtet werden, um einen in allen Schritten reproduzierbaren Verfahrensablauf bei der Herstellung des supraleitenden Magneten zu gewährleisten.

Bei der Planung der neuen Wickelmaschine wurde auf maximale Flexibilität hinsichtlich der zu wickelnden möglichen Spulengeometrien gelegt. Daher wurden alle Komponenten in einen leicht zu erweiternden Aluminiumprofilrahmen eingebaut. Alle Antriebe und Lineareinheiten sind auf das Profilsystem mechanisch ausgelegt und erlauben ohne Einschränkung der erforderlichen Präzision eine relativ einfache Anpassung aller Komponenten. In Abbildung 1 ist der Aufbau der Wickelmaschine als 3D Konstruktionsansicht dargestellt. Spindelstock (Wickler) und Reitstock zum Spannen des Wickelkörpers sind auf einem besonders verwindungssteifen gemeinsamen Wickelachsen-Support montiert. Der Spulenkörper wird zwischen der angetriebenen Arbeitsspindel (über ein Spannfutter) und einer Zentrierspitze im Reitstock gespannt. Spindelstock und Reitstock können im Spitzenabstand auf Präzisionsprofilschienen von Null bis 800 mm verstellt werden, damit können Spulen bis 800 mm Länge (Wickelbreite) und einem maximalen Durchmesser (Flugkreisdurchmesser) bis 250 mm gewickelt werden. Die Drahtführung wird über eine Doppelrohr-Linearachse mit Spindeltrieb² die auf einem eigenen Vorschubachsen-Support montiert ist, parallel zur Wickelachse nachgeführt (Vorschub). Das Doppelrohr-System garantiert in Kombination mit der Kugelgewindespindel einen leichten und präzisen Lauf. Auf dem Führungsschlitten der Vorschub-Linearachse ist die eigentliche Drahtführungseinheit mit der Vertikalverstellung (Vorleger) auf einer Werkzeug Schnellmontage-Nutsystem-Grundplatte montiert. Die Nutsystem-Grundplatte ist beidseitig geschliffen und bietet flexible und präzise Montagemöglichkeiten für alle Norm-Spannvorrichtungen für Werkzeugmaschinen im V40-Rastermaß. Mit der Vertikalverstellung kann die Drahtposition über eine Kurzhub-Linearachse³ senkrecht zur Wickelachse variiert werden. Damit wird für jeden Spulendurchmesser eine tangentielle Auflage des Drahtes auf den Wickelkörper (Vorleger) garantiert. Wickelachsen- und Vorschub-Support sind auf 3 Präzisionsprofilführungsschienen linear-verschiebbar montiert. Mit einer weiteren Kurzhub-Linearachse kann der Abstand zwischen Wickelkörper und Vorschubachse variiert werden (Positionierer). Dies ermöglicht die individuelle Drahtauflage bei nicht Rotationssymmetrischen Wickelkörpern. Die Drahtführung erlaubt also eine in 3 Achsen unabhängige Drahtpositionierung auf dem Wickelkörper. Hochpräzise oder orthozyklische Wickelbilder erfordern insbesondere bei dünnen supraleitenden Drähten eine aufwendige aktive Zugspannungs- und Abwicklersteuerung. Werden Spulen mit einer großen Windungszahl gewickelt, muss die Abwicklerhaspel in der Lage sein, teils schwere Kabeltrommeln aufnehmen zu können. Daher wurde für die neue Wickelmaschine eine aktiv angetriebene Abwicklerhaspel (Abwickler) integriert. Drahtvorratsspulen bis 300 mm Durchmesser und einem Gewicht von bis zu 20 Kg können eingesetzt werden.

Insgesamt stehen in der neuen Wickelmaschine 5 unabhängige computergesteuerte Achsen zur Herstellung der Spulen zur Verfügung. Für die Antriebe der Achsen werden drehmomentangepasste Servomotoren der Serie AKM von Kollmorgen⁴ mit hochauflösenden Encodern und vorgeschalteten spielfreien Planetengetrieben von Planetroll⁵ mit einem Übersetzungsverhältnis von 1:10 (Wickler, Vorschub, Abwickler) und 1:9 (Vorleger, Positionierer) eingesetzt. Der Wickler kann in dieser Konfiguration mit bis zu 300 U/min betrieben werden bei einem maximalen Drehmoment von 48.2 Nm am Spannfutter. Berücksichtigt man die Masse des Spannfutters und die des geometrisch maximal möglichen Wickelkörpers (Kupfer) dann ist der Antrieb mehr als ausreichend ausgelegt und bietet Entwicklungsspielraum nach oben. Für den Abwickler kommt die gleiche Motor-/Getriebekombination des Wicklers zum Einsatz. Auch sie ist für die Anforderungen des Abwicklers ausreichend ausgelegt.

Für die Vorschubachse wurde ein Servomotor mit einer Nenndrehzahl von 4500 U/min gewählt. Mit der nachgeschalteten Getriebeübersetzung von 1:10 und der Spindelsteigung von 5 mm/U des Doppelrohr-Linearantriebs sind Verstellgeschwindigkeiten des Vorschubs bzw. der Drahtführung am Wickelkörper von bis zu 37.5 mm/sec möglich. Die hohe Vorschubgeschwindigkeit ermöglicht hohe Drehzahlen des Wicklers beim Wickelvorgang. Sofern der Nasswickelprozess es zulässt können auch Spulen mit hohen Windungszahlen ($N > 10000$) auf der Wickelmaschine in einem Arbeitsprozess in überschaubarer Zeit hergestellt werden. Das Drehmoment der Antriebseinheit beträgt an der Spindelachse 38.8 Nm und ermöglicht je

nach Aufbau und Masse der Drahtführungseinheit hohe Beschleunigungen des Führungsschlittens der Vorschub-Lineareinheit. Die Repetiergenauigkeit der Vorschubeinheit liegt mechanisch bei $50\mu\text{m}$ und elektronisch bei $5\mu\text{m}$.

An der Vorleger-Kurzhub-Linearachse ist eine Servomotor-Getriebe Kombination mit 444.4 U/min und einem Drehmoment von 9.72 Nm an der Spindel montiert. Bei einer Spindelsteigung von 1 mm/U sind Verstellgeschwindigkeiten von bis zu 7.4 mm/sec möglich. Die hohen Verstellgeschwindigkeiten sind nur bei nicht rotationssymmetrischen Spulengeometrien (z.B. Rechteckspulen) relevant, im Normalbetrieb justiert der Vorleger die Ablage des Drahtes auf dem Wickelkörper nur beim Lagenwechsel.

Der Antrieb der Positionierer-Kurzhub-Linearachse ist identisch mit dem der Vorleger-Kurzhub-Linearachse. An den Positionierer werden keinerlei Anforderungen hinsichtlich der Geschwindigkeit oder beschleunigten Masse gestellt, er dient lediglich zur Anpassung des Abstands zwischen Wicklerachse und Vorschub-Lineareinheit.

Die Antriebssteuerung der Motoren und das Regelsystem für Achsenabhängige Bewegungsabläufe wird im Abschnitt Antriebssteuerung und Regelsysteme der Wickelmaschine detailliert beschrieben. In der aktuellen Ausbaustufe der Maschine können so alle angenommenen Windungs- bzw. Wicklungsformen im Nasswickelverfahren unter Verwendung von Supraleitern bzw. Kupferdrähten bis zu einem Durchmesser von 0.7 mm gewickelt werden.

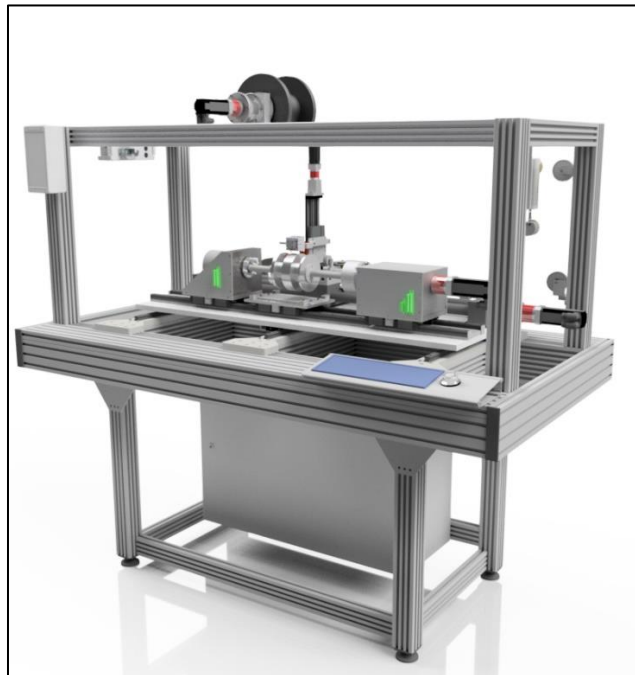


Abbildung 1. 3D-Konstruktionszeichnung der Wickelmaschine

Drahtführung und Zugspannungskontrolle

Voraussetzung für ein homogenes Wickelbild der Spule auch bei sehr dünnen Drähten ist eine gleichbleibende Zugspannung des Drahtes beim Wickelvorgang. Der erforderliche Einstellbereich der Zugspannung für die supraleitenden Drähte der geplanten Spulen liegt zwischen 0.5 N und bis zu 10 N (abhängig vom Drahtdurchmesser) bei einer Abweichung von max. 2% . Diese Genauigkeitsklasse lässt sich mit einer mechanischen Zugspannungsregelung nicht mehr realisieren, daher wurde in der neue Wickelmaschine ein

elektromagnetischer Tänzer⁶ eingebaut. Die Tänzerkraft des elektromagnetischen Tänzers bleibt im Gegensatz zu pneumatisch, federbasierten oder mechanisch betriebenen Tänzersystemen unabhängig von der Tänzerlage stets konstant. Eine Abweichung aus der Mittellage des Tänzerarms führt damit nicht zu einer Veränderung der Zugkraft bzw. Zugspannung. Sie dient lediglich als Führungsgröße der PI-Geschwindigkeitsregelung des Abwicklermotors. Damit kann der Tänzer die Zugkraft auch bei Veränderung der Spulendrehzahl bzw. Wicklergeschwindigkeit je nach vorgegebenem Sollwert exakt halten. Um eine genaue Regelung der Zugkraft im gesamten Drahtführungssystem von der Drahtspindel bis zum Wickler zu gewährleisten werden leichtlaufende Umlenkrollen mit polierten Keramikaufläufen verwendet. Die geringe Masse der Umlenkrollen und die automatische Kompensation der Masse des Tänzerarms und der Führungsrollen durch eine interne Kalibrierung im Tänzer garantieren die hohe Präzision der dynamischen Wickelparameter beim Wickelvorgang.

Klebstoffbenetzung

Typischerweise werden beim Nasswickelverfahren kleine Mengen des Klebstoffes durch den Operateur während des Wicklungsprozesses mit einem Pinsel oder Spachtel auf die Wicklung aufgetragen. Muss der Klebstoff zusätzlich vorgeheizt werden, um seine Viskosität abzusenken, wird er in der Regel aus einem externen, beheizten Vorratsbehälter entnommen und aufgetragen. Aufgrund der zur überbrückenden Distanz zwischen Behälter und Wicklung ist ein Auskühlen nicht zu vermeiden. Temperaturschwankungen sind die Folge und es besteht die Gefahr, dass durch das manuelle Auftragen vermehrt Luft in den Klebstoff eingearbeitet wird. Eine gleichbleibende und reproduzierbare Verarbeitung des Klebstoffes ist unter diesen Umständen nicht gewährleistet und hat somit einen nicht zu vernachlässigen negativen Einfluss auf die Eigenschaften der Klebung.

In der neuen Wickelmaschine wurde eine automatisierte Klebstoffauftragung implementiert, die den Draht während des Wickelvorgangs aus einem beheizbaren Klebstoffreservoir mit dem Kleber benetzt. Der Draht wird dabei durch zwei Hohladeln für den Ein- und Auslass am unteren Ende des Behälters durch das Reservoir hindurchgeführt. Das Klebervolumen pro Drahtlänge wird durch den Innendurchmesser der Ausgangsnadel und dem Drahtdurchmesser selbst definiert. Der kurze und gleichbleibende Weg, vom Nadelaustritt zum Spulenkörper (<5cm) reduziert ein mögliches Auskühlen des Klebstoffes auf ein Minimum. Der Wickelprozess selbst läuft damit weitestgehend automatisiert ab. Lediglich der Vorratsbehälter der Kleberzuführung muss bei Bedarf aufgefüllt werden. Wenn erforderlich, kann der Kleber im Klebstoffreservoir resp. im Behälter im Exsikkator entgast werden. Damit auch Klebstoffe mit thermischen Füllmaterialien wie Aluminiumoxid (Al_2O_3) verwendet werden können wurden die Hohladeln aus Keramik gefertigt. Die Ein- und Austrittsöffnungen der Keramikadeln sind extra abgerundet, um Beschädigungen der dünnen und empfindlichen Drahtisolation zu verhindern.

Heizsystem zum Vorheizen und Aushärten des Klebstoffes

Praktisch alle Epoxidharzklebstoffe mit einer akzeptablen Endfestigkeit benötigen zur Vernetzung eine externe Wärmezufuhr. Dabei hat die Temperaturführung (Temperaturrampe) während des Aushärteprozesses maßgeblichen Einfluss auf die Eigenschaften einer Klebung. Insbesondere ist eine gleichmäßige Erwärmung des Klebstoffes zu gewährleisten, um unterschiedliche Vernetzungszustände während des Aushärtens zu vermeiden. Gerade dieser Punkt stellt sich je nach Größe des Wickelkörpers aufgrund der thermischen Masse des Magneten und der unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten der Materialien (Metalle, Epoxidharz) als herausfordernd dar. Während des Härteprozesses muss der Magnet zwingend kontinuierlich um seine Rotationsachse gedreht werden, da bei einer statischen Aufhängung der Spule der niedrig viskose Klebstoff aufgrund der Gravitation verläuft und sich "Klebernasen" bilden bzw. sich im Spulenpaket unterschiedliche Klebverteilungen ausbilden.

Es wurden verschiedene technische Lösungsansätze zur optimalen Wärmeübertragung beim Aushärteprozess untersucht. Die Verwendung von Infrarotstrahlern eignet sich insbesondere für dünne Spulen (Träger plus Windungen ≤ 2 mm). Bei dicken Spulen zeigte sich recht schnell, dass mit Infrarotstrahlern oder einem Umluftofen keine zufriedenstellenden Ergebnisse zu erzielen war. Insbesondere eine gleichmäßige Erwärmung des Magneten konnte nicht erreicht werden, da die Wärmeankopplung praktisch nur über die Außenflächen mit heißer Luft oder Strahlung gegeben war. Als beste Methode stellte sich die Verwendung von Heizpatronen dar, die auf den Spulenträger selbst oder auf einem Heizring im Spulenkern kontaktiert und mit einem leistungsfähigen PID-Regelungssystem betrieben werden. Die gute Wärmeleitung des Trägermaterials (i.R. Kupfer oder Aluminium) sorgt für eine deutlich bessere Wärmeverteilung über die Gesamtstruktur. Die Fähigkeit, eine definierte, langsame und autarke Temperaturrampe zu fahren (8h aufheizen, 2h Temperatur halten, 4h abkühlen), reduziert die Temperaturgradienten im Magneten auf ein Minimum.

Damit das Heizsystem auch bei rotierendem Spulenkörper betrieben werden kann, wurde im Spindelstock (Wickler) und im Reitstock jeweils ein Schleifring zur Energieversorgung der Heizpatronen und zur Auslese der notwendigen Temperatursensoren auf dem Wickelkörper eingebaut. Die Schleifringe sind zwischen dem Antriebsmotor und der Spannvorrichtung (Spindelstock) und hinter der Spannvorrichtung im Reitstock platziert. Sie liegen damit außerhalb des Arbeitsbereichs der Wickelmaschine. Die elektrischen Verbindungen werden über Steckverbindungen an den Spannvorrichtungen hergestellt. Der Schleifring im Spindelstock bietet 2 zweipolige Leistungskanäle mit einer elektrischen Belastbarkeit von 1KW und 4 zweipolige Messkanäle. Das System im Reitstock ermöglicht den Anschluss von 6 zweipoligen Messkanälen. Der modulare Aufbau ermöglicht nicht nur das Aushärten des Klebers bei rotierendem Wickelkörper, sondern eröffnet auch die Möglichkeit schon während des Wickelvorgangs den Spulenkörper auf eine definierte Temperatur vorzuheizen. Damit können auch hochviskose einkomponentige Epoxidharze als Klebstoffe durch thermisches Absenken der Viskosität in Verbindung mit der vorgeheizten Klebstoffbenetzung im Nasswickelverfahren eingesetzt werden.

Antriebssteuerung und Regelsysteme der Wickelmaschine

Für die Auswahl der Softwareumgebung zur Programmierung der Antriebssteuerung und Regelung der Achsantriebe der Wickelmaschine stand die Skalierbarkeit und Systemintegrierbarkeit von bereits vorhandenen Messsystemen zur Überwachung der Bewegungsabläufe in der Maschine im Vordergrund. Andererseits muss das Steuerungssystem die hohen Echtzeit-Anforderung der teilweise gekoppelten Antriebe bzw. abhängigen Achsen zwingend erfüllen. Gerade die aktive Zugspannungsregelung zwischen Wickler und Abwickler erfordern eine extrem kurze Latenz zwischen den Stell- und Regelgrößen auch bei hohen Drehzahlen der Antriebe. Da alle unsere Messsysteme in der Arbeitsgruppe über ein LabVIEW⁷-basiertes Datenerfassungssystem gesteuert und ausgelesen werden und wir über viele Jahre große Erfahrung mit dem Einsatz der Programmierumgebung gesammelt haben, wurde für die Wickelmaschine ein EtherCAT-basiertes Motorsteuerungssystem von National Instruments (NI)⁸ gewählt (Abbildung 2). Bei EtherCAT (Ethernet Control Automation Technology) handelt es sich um ein leistungsstarkes Kommunikationsprotokoll für deterministisches Ethernet im industriellen Umfeld und wird im Allgemeinen in Anwendungen im Bereich Maschinenbau oder zur Motorsteuerung eingesetzt. EtherCAT-Servoantriebe von NI bieten die erforderliche Leistung, Flexibilität, Skalierbarkeit und den Leistungsbereich für unsere Anforderungen an die Motorsteuerungsanwendungen in der Wickelmaschine: von einfachen Drehmoment- und Geschwindigkeitsregelungen bis zur programmierbaren Motorsteuerung für mehrere Achsen mit NI LabVIEW und dem LabVIEW NI SoftMotion Module. Zentrale Komponente des Motorsteuerungssystems ist ein Echtzeit-Controller (NI-cRIO9035) mit einem linuxbasierten RT-Betriebssystem (NI Linux Real-Time), der als EtherCAT-Master mit den 5 EtherCAT-Drives der Maschine über Standard-CAT Kabel verbunden ist⁹. Die Anwendungen und Algorithmen zur Steuerung und Regelung der Motoren und die Synchronisation der

Prozesse bei abhängigen Achsen laufen ausschließlich auf dem Echt-Zeit-Controller (NI-SoftMotion-Engine). Der Taktgeber (Scan-Engine) synchronisiert den Datenaustausch zwischen den Motoren auf $< 1\mu\text{s}$ und ermöglicht gekoppelte Bewegungen mehrerer Achsen im sogenannten Getriebe- oder „Camming“-Modus. Ein Solenoid zum Beispiel wird im Getriebe-Modus von Wickler und Vorschub gewickelt. Neben der Anbindung der Servomotoren über den Ether-CAT-Bus bietet das cRIO-System (Echt-Zeit-Controller) weitere Steckplätze zur Aufnahme von Ein- und Ausgabemodulen für die in der Wickelmaschine verbauten Sensoren und Aktoren. In der aktuellen Konfiguration sind Module zur analogen Signalverarbeitung (NI-9215 und NI-9264), mit digitalen Ein- und Ausgängen (NI-9425 und NI-9474), seriellen Schnittstellen (NI-9870, RS232) und ein BiSS-C/SSI Interface Module¹⁰ zur Auslese der optischen Positionserfassung des Vorschubschlittens eingebaut. Die Module können direkt aus der SoftMotion-Engine heraus angesprochen bzw. ausgelesen werden und in der Ablaufsteuerung verwendet werden. In dem cRIO-System steht neben dem Prozessor, der das NI Linux Real-Time ausführt, ein programmierbarer FPGA zur Verfügung. Besonders zeitkritische Regelprozesse oder Datenaustauschfunktionen mit den Erweiterungsmodulen, die von der SoftMotion-Engine nicht direkt unterstützt werden, können über das FPGA in die SoftMotion-Engine eingebunden werden. So wird die Abweichung des Tänzers (Zugspannungsmessung) aus der Solllage als analoges Eingangssignal an den FPGA weitergegeben, dort in einer Regelschleife die neue Sollgeschwindigkeit für den Abwickler berechnet und über die SoftMotion-Engine via Ether-CAT an den Motorcontroller und den Servomotor übergeben. Die Sollvorgabe der Zugkraft für den Tänzer geschieht über das RS-232-Modul des Controllers. In ähnlicher Weise wird die aktuelle Position des Vorschub-Schlittens über eine optische Positionserfassung¹¹ an das BiSS-C/SSI Modul und einem Algorithmus auf dem FPGA des cRIO-Controllers der SoftMotion-Engine im gleichen Controller zur Weiterverarbeitung bereitgestellt.

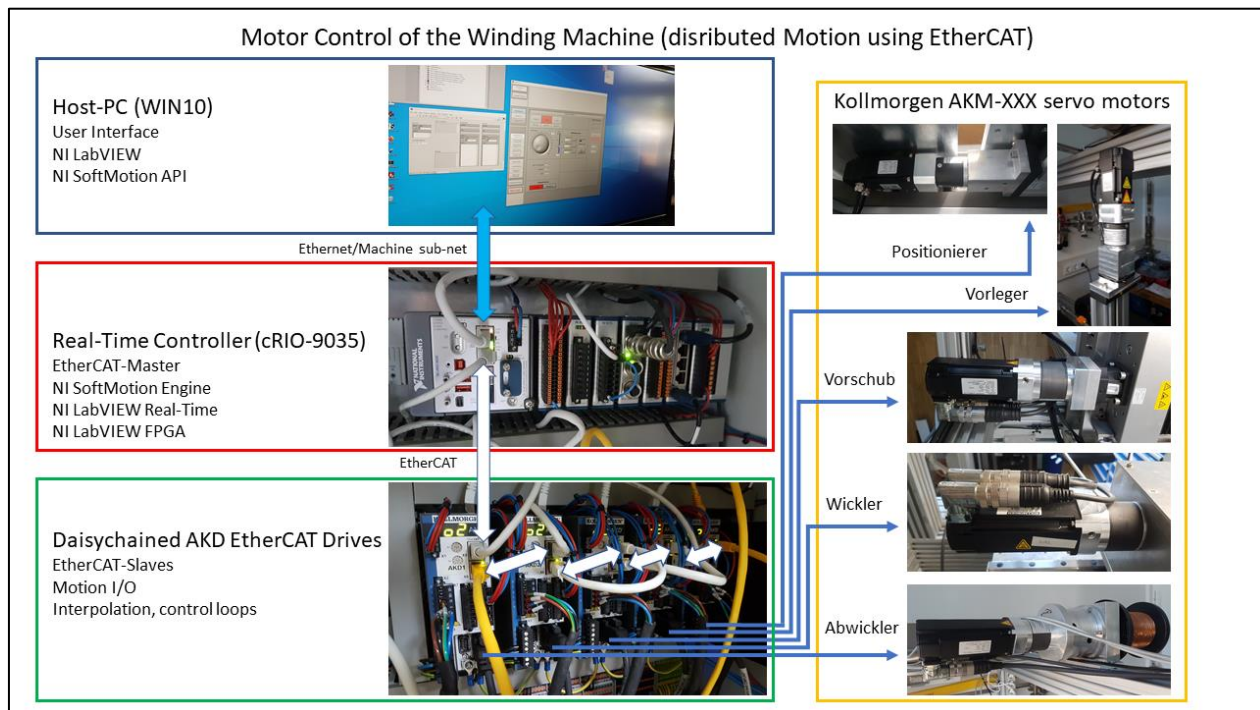


Abbildung 2. Schematische Darstellung der Motorsteuerung der Wickelmaschine

Die LabVIEW-Entwicklungsumgebung zur Programmierung der Echtzeitanwendung resp. des FPGA und das User-Interface zur Kontrolle und Steuerung aller Betriebszustände und -Parameter der Wickelmaschine werden unabhängig vom Echt-Zeitsystem auf einem WIN10-basierten Host-PC betrieben. Der Host-PC kommuniziert über eine Standard-Ethernetverbindung und zwei unabhängigen verlustfreien, unidirektionalen, Punkt-zu-Punkt TCP-IP-Kommunikationskanälen (NetworkStream) mit dem Echt-Zeit-Controller. Alle User-relevanten Daten die im Echt-Zeit-System bzw. beim Wickelprozess anfallen, werden über den

NetworkStream <cRIO -> Host-PC> an das User-Interface asynchron übertragen. Ebenso werden alle Steuerungs- und Sollwertvorgaben die der Benutzer am User-Interface vornimmt über den zweiten Kanal an das cRIO-System übergeben.

Die in LabVIEW programmierten VIs (Virtual Instruments) des User-Interface werden nicht als Executable ausgeführt, sondern in einem Projekt(-Container) innerhalb der Entwicklungsumgebung von LabVIEW. Das erfordert etwas mehr Aufwand beim Starten des User-Interface, aber es ermöglicht auch die kurzfristige Anpassung der VIs an den Prozess. Der Betrieb der Wickelmaschine wird über zwei VIs gemanagt die unabhängig in eigenen Tasks ausgeführt werden, einem VI zum Starten der Prozesse auf dem Echt-Zeit-Controller und das eigentliche User-Interface für die Ein- und Ausgabe. Das User-Interface-VI selbst ist als VI-Manager aufgebaut. Alle notwendigen VIs für die Steuerung und Überwachung der Kommunikation zwischen dem Host-PC und dem Echt-Zeit-Controller (NetworkStreams) und der einzelnen Achsen der Wickelmaschine werden von ihm startet, überwacht und verwaltet. Jede dieser Funktionalitäten ist als eigenständiges VI programmiert und werden in jeweils eigenständigen Tasks im Hintergrund ausgeführt. Der Benutzer ruft bei Bedarf die Funktionalität auf (z. B. wenn für eine bestimmte Achse die Sollposition geändert werden soll) und der VI-Manager stellt die Bedienoberfläche (Front Panel) des betreffenden VIs im eigenen VI-Container dar. Der Benutzer kann nun die Parameter ändern. Diese Programmarchitektur ermöglicht größte Flexibilität und Skalierbarkeit. Benötigt der Anwender zusätzliche Informationen oder Steuerungsmöglichkeiten, kann dem System jederzeit ein neues VI mit dieser neuen Funktionalität hinzugefügt werden. Soll die neue Funktionalität sich auch auf den Echt-Zeit-Prozess der Motorsteuerung beziehen und auf eine dort nicht vorhandene Funktion, z.B. ein neuer gekoppelter Betriebsmodus verschiedener Achsen, ausführen, muss diese Funktionalität auch auf dem Echt-Zeit-Controller implementiert werden. Erweitert der Benutzer das User-Interface um eine neue Funktionalität, muss er lediglich in seinem neuen VI die Definitionen und die Struktur des VI-übergreifenden Daten- und Variablenmanagements des User-Interface-VIs implementieren, damit das neue VI mit den bestehenden VIs kommunizieren kann. In diesem Sinne sind auch nicht zeitkritische Regel- und Steuerungsaufgaben des Wickelprozesses programmiert. Sie werden nicht auf dem Echt-Zeit-Controller ausgeführt, sondern auf dem Host-PC. Das erleichtert die Anbindung von Messgeräten über die Standard-Schnittstellen des PCs und gibt mehr Flexibilität bei der Gestaltung der VIs. So werden die externen PID-Regelsysteme¹² für die Temperaturregelungen der Kleberbenetzung und der Aushärtevorrichtung über die RS-232 Schnittstellen des Host-PCs von einem gesonderten VI im User-Interface-VI parametrisiert, gesteuert und ausgelesen.

Alle anfallenden Parameter und Messdaten, die den aktuellen Betriebszustand der Wickelmaschine beschreiben, werden von einem eigenen VI innerhalb des VI-Managers kontinuierlich gespeichert oder in einem separaten VI historisch visualisiert. So ist eine lückenlose Dokumentation der Betriebsabläufe der Wickelmaschine gewährleistet und es ist immer nachvollziehbar, welche Windung zu welcher Zeit unter welchen Bedingungen gewickelt wurde.

Performance

Der Prozessablauf beim Wickeln einer Spule (Solenoid) ist im Prinzip so eingerichtet, das der Vorschub dem Wickler mit einem festgelegten Kopplungsfaktor (Drahtdurchmesser) beim Wickeln einer Lage folgt (Gearing-Mode). Zu Beginn wird dem Wickler an einer Referenzposition (linker oder rechter Rand der Spule) eine neue Sollposition (Anzahl der Windungen pro Lage) vorgegeben und der Prozess gestartet. Die Geschwindigkeit des Wicklers ist die Führungsgröße in der folgenden, gekoppelten Bewegung. Bei der Annäherung an die Sollposition (Ende der Lage) wird die Geschwindigkeit reduziert und geht auf null bei Erreichen des Umkehrpunktes. Hier wird die vertikale Drahtposition über den Vorleger angepasst und die Vorschubrichtung gewechselt. Die neue Sollposition wird dem Wickler übergeben und die Geschwindigkeit wieder bei gegebener Beschleunigung auf die Soll Geschwindigkeit erhöht und die neue Lage gewickelt. Parallel sorgt die Tänzerregelung dafür, dass unabhängig von der Umfangsgeschwindigkeit des Spulenträ-

gers zu jedem Zeitpunkt der Draht mit einer konstanten Zugspannung auf den Wickelkörper (Spule) aufgelegt wird. Der Vorgang wiederholt sich automatisch bis die vorgegebene Anzahl Lagen und damit Gesamtwindungszahl erreicht ist. Der vom Benutzer vorzugebende Parametersatz für den Wickelprozess umfasst den Anfangsspulendurchmesser R_s , die Anzahl der Windungen pro Lage N_L , die Anzahl der zu wickeln- den Lagen L , den Drahtdurchmesser D_0 und die vertikale Verstellung D_v (per Default ebenfalls der Draht- durchmesser). Nun wird im Nasswickelverfahren der Draht kontinuierlich mit Kleber benetzt. Dieser Kle- berauftrag ist bei der Eingabe des Drahtdurchmessers zu berücksichtigen. Der effektive Drahtdurchmesser D_{eff} auf dem Wickelkörper wird in Abhängigkeit von der Kleberviskosität größer (typischer Weise beträgt der Kleberauftrag bei niedrigviskosen Klebern etwa $2.5\mu\text{m}$, d.h., es ergibt sich ein Durchmesserzuwachs von $5\mu\text{m}$). Die gleiche Betrachtung gilt ebenfalls für die vertikale Verstellung. Soll der Draht möglichst or- thozyklisch gewickelt werden, sollte die Verstellung maximal $D_{eff}/2 * \sqrt{3}$ betragen. Beide Parameter können während der Wickelvorgangs verändert werden. Da allerdings die äußeren Abmessungen des Spu- lenkörpers fix bleiben, ist der Variationsbereich der beiden Werte naturgemäß eingeschränkt. Das spätere Wickelbild ist stark von der eingestellten Zugspannung abhängig, vor allem für die weiter Außen liegenden Lagen. Die Erfahrung zeigt, dass die Zugspannung im laufenden Wickelprozess von Zeit zu Zeit angepasst werden muss. Daher kann dieser Parameter ebenfalls im Betrieb verändert werden. Eine automatische Anpassung ist aktuell nicht vorgesehen aber softwaretechnisch möglich. Ist der Wickelprozess gestartet, kann der Bediener nur noch die Geschwindigkeit und die Beschleunigung des Wicklers variieren. Alle an- deren dynamischen Wickelparameter werden von der Motorsteuerung resp. von der Kontrollsoftware au- tomatisch angepasst. Der Bediener hat natürlich immer die Möglichkeit des Wickelprozess zu stoppen und zu starten bzw. im Rahmen der Sicherheitseinrichtungen der Maschine über eine Notabschaltung zu be- enden. Im Gegensatz zur bereits vorhandenen Wickelmaschine ist der Wickelprozess auf der neuen Wi- ckelmaschine weitestgehend automatisiert worden.

In ersten Testwicklungen für die geplanten internen supraleitenden Spulen und in einem Projekt zur Ent- wicklung eines indirekt gekühlten supraleitenden Helmholtzmagneten für Ultrahochvakuumanwendun- gen konnte die Leistungsfähigkeit der neu entwickelten Wickelmaschine unter Beweis gestellt werden.

Es sind die höhere Positioniergenauigkeit des Drahtes auf dem Wickelkörper, die definierten Umkehr- punkte beim Lagenwechsel, die tangentielle Drahtauflage, die automatische Kleberbenetzung und nicht zuletzt die genaue Zugspannungsregelung des Drahtes die die Wicklungsqualität und Drahtdichte im Wick- lungspaket der Spule gegenüber der vorhandenen Wickelmaschine deutlich verbessert haben. Auf dieser Maschine ist orthozyklisches Wickeln im Nasswickelverfahren aktuell bis 10 Lagen möglich. Im Verlauf der Wicklungstests konnte auch die Wickelgeschwindigkeit ohne Einschränkung der Wicklungsqualität um ei- nen Faktor 3 erhöht werden. Das eröffnet die Möglichkeit auch Epoxidharze mit deutlich kürzeren Topf- zeiten als den bisher verwendeten einzusetzen. Die hohe Präzision beim Wickeln und die höhere Wickel- geschwindigkeit verbessert die Qualität nassgewickelter Spulen mit hohen Windungszahlen ($N > 1000$) überproportional. Die gemeinsam mit unserem Kooperationspartner CryoVac¹³ entwickelten Helmholtz- spulen stellen extrem hohe Anforderungen an den Wickelprozess und die Wickelmaschine. Beide Spulen- pakete der Helmholtzkonfiguration mit je 100 Wicklungen/Lage und 125 Lagen wurden in einem Herstel- lungsprozess mit einem nichttransparenten, hochviskosen, mit Füllstoff angereicherten Epoxidharz und einem dünnen supraleitenden Draht ($D = 0.279 \text{ mm}$) nass gewickelt. Dabei musste der Spulenträger (Wi- ckelkörper) und die Klebstoffbenetzung während des gesamten Wickelvorgangs zur Verringerung der Vi- skosität des Harzes auf 70°C geheizt werden. Die komplette Spule mit ihren 25000 Windungen konnte ohne Einschränkung der Qualität innerhalb von 3 Stunden (reine Wickelzeit) gewickelt werden. Mit der in der Wickelmaschine integrierten Aushärtevorrichtung wurde die Spule direkt im Anschluss in der gleichen Auf- spannung in einem speziellen Temperaturzyklus über 14 Stunden ausgehärtet. Trotz der großen Anzahl an Lagen konnte vor allem bei den äußeren Lagen eine gute Wickeldichte und homogen Wicklungsverteilung erreicht werden. Mit der Wickelmaschine konnte erstmals der sehr anspruchsvolle Kleber, der sich durch

seine speziellen Eigenschaften ideal für Hochvakuumanwendungen eignet, im Nasswickelverfahren für supraleitende Spulen eingesetzt werden.

Zusammenfassung

In der aktuellen Ausbaustufe steht mit der neuen Wickelmaschine ein ideales Werkzeug zur Verfügung mit dem in hoher Qualität die geplanten internen supraleitenden Polarisationsmagnete für die in Bonn an ELSA und dem Crystal-Barrel-Detektor und in Mainz an MAMI und A2 betriebenen Polarisierten Targets hergestellt werden können. Mit diesen Spulen können die bestehenden polarisierten Targets im sogenannten ‚ 4π -continuous-mode‘ betrieben werden und damit die Effizienz und Genauigkeit der geplanten Streuexperimente am Crystal-Barrel und A2-Detektor wesentlich verbessert werden¹⁴. Im Rahmen des EU-Projektes STRONG-2020¹⁵ soll der klassische interne Solenoid (als Polarisationsmagnet oder longitudinale ‚Haltespule‘) des polarisierten Targets zu einem Hybridmagneten erweitert werden. Mit dieser Magnetkonfiguration (Solenoid mit außenliegendem ‚race-track‘ Dipol) können mit dem vorhandenen Polarisierten Target neue Polarisationsobservablen in Zukunft vermessen werden. Die Wickelmaschine bietet die technischen Voraussetzungen für die Herstellung dieser Magnetkonfigurationen.

Die vorliegende Arbeit wurde unterstützt und finanziert vom Physikalischen Institut der Universität Bonn, dem Kooperationsprojekt des BMWI „Entwicklung von hochpräzisen Wickeltechniken zur Herstellung von UHV-tauglichen supraleitenden Spulen“ (Förderkennzeichen ZIM, ZF4487601DF7) und aus dem Forschungs- und Innovationsprogramm Horizon 2020 der Europäischen Union mit dem Förderkennzeichen Nr. 824093.

¹ Bornstein, Diplomarbeit, BN-IR-2013-11 (2013)

² Rose+Krieger, COPAS (Doppelrohr-Linearachse), <https://www.rk-rose-krieger.com/deutsch/produkte/linear-technik/>

³ Rose+Krieger, RK Compact (Profil-Linearachse), <https://www.rk-rose-krieger.com/deutsch/produkte/linear-technik/>

⁴ Kollmorgen, AKMXX-Drives, <https://www.kollmorgen.com/de-de/products/motors/servo/akm-series/akm-servo-motoren/>

⁵ Planetroll, Planetengetriebe, https://www.planetroll.de/de/antriebstechnik/planetdrive_pd_planetengetriebe/index.php

⁶ Supertec, EDL60, <https://www.supertec.de/produkte-und-services/wickeltechnik/zugkraftregler>

⁷ National Instruments, LabVIEW, <https://www.ni.com/de-de/shop/labview.html>

⁸ National Instruments, <https://www.ni.com/de-de/innovations/white-papers/10/networking-technologies-for-motion-control-applications.html>

⁹ National Instruments, <https://www.ni.com/de-de/innovations/white-papers/12/building-an-ni-motion-control-system.html>

¹⁰ SEA 9521 BiSS-C/SSI Interface Module, <https://www.sea-gmbh.com/en/products/compactrio-products/interface-busses/sea-9521-bisssi/>

¹¹ Renishaw, RESOLUTE encoder series, <https://www.renishaw.com/en/resolute-encoder-series--37823>

¹² CryoVac, TIC 500, <http://www.cryovac.de/index.php/cryo-equipment/cryogenic-temperature-control>

¹³ *Entwicklung von hochpräzisen Wickeltechniken zur Herstellung von UHV-tauglichen supraleitenden Spulen*, ZIM, ZF4487601DF7

¹⁴ H. Dutz, *CryPTACryogenicPolarizedTarget Applications*, in ‘The strong interaction at the frontier of knowledge: fundamental research and applications’, STRONG2020, Nantes, 2019

¹⁵ STRONG2020, JRA10-CryPTA, <http://www.strong-2020.eu/joint-research-activity/jra10-crypta.html>