

Flexible Prozessführung für den Musterbau von Hairpin-Statoren elektrischer Traktionsmotoren

Maschinenmodul zum sequentiellen Hairpin-Twisten

D. Schröder, S. Henschel, J. Fleischer

ZUSAMMENFASSUNG Die klassische Prozesskette zur Produktion von Hairpin-Statoren für elektrische Traktionsmotoren ist stark werkzeuggesteuert, insbesondere der Prozessschritt des Twistens der Hairpin-Wicklung. In diesem Beitrag wird ein einfaches Maschinenmodul vorgestellt, das einen flexiblen, sequentiellen Twistprozess ermöglicht. Es besteht aus einem Industrieroboter, einem einfachen Twistwerkzeug sowie verschiedenen Sensoren zur Prozessüberwachung und der zugehörigen Steuerungslogik.

STICHWÖRTER

Flexible Fertigungssysteme, Messen/Steuern/Regeln, Industrieroboter

Flexible process control for the prototyping of hairpin stators for electric traction motors – Machine module for sequential hairpin twisting

ABSTRACT The classic process chain for producing hairpin stators for electric traction motors is heavily tool-based, especially the process step of twisting the hairpin winding. This article presents a simple machine module that enables a flexible, sequential twisting process. It consists of an industrial robot, a simple twisting tool, various sensors for process monitoring, and the associated control logic.

1 Einleitung

In den vergangenen Jahren hat sich die Hairpin-Technologie als bevorzugte Wickeltechnologie zur Herstellung von Statoren für elektrische Traktionsmotoren etabliert. Die vorliegende Prozesskette, welche die Formgebung (Biegen) der Steckspulen, sogenannte Hairpins, die anschließende Vormontage (Setzen), das Einbringen (Fügen) in den Stator sowie das anschließende Twisten (Verschränken) und Kontaktieren (Schweißen) der Hairpin-Enden umfasst, erlaubt einen hohen Automatisierungsgrad und somit eine kosteneffiziente Massenfertigung [1].

Allerdings sind die bestehenden Prozessketten stark werkzeuggesteuert, beispielsweise durch den Einsatz von Gesenken bei der Formgebung, durch spezielle Fingergreifer beim Fügen und insbesondere durch komplexe Twistwerkzeuge beim Twisten der Hairpin-Enden. All diese Werkzeuge sind auf genau ein Stator-Design ausgelegt [2]. Auch geringfügige Modifikationen des Produktdesigns bedingen in der Regel die Anpassung und Fertigung neuer Werkzeuge, was zu langen Stillstandszeiten und hohen Kosten führt. So liegt ein Twistwerkzeugsatz häufig im Bereich von 100 000 bis 200 000 Euro [3].

Für den Musterbau und die Kleinserienfertigung von Hairpin-Statoren sind diese Kosten prohibitiv, weshalb Prototypen häufig erst spät im Entwicklungsprozess gefertigt werden können. Ein einfacherer und schnellerer Musterbau würde jedoch eine frühere Validierung von Designs und damit eine schnellere Markteinführung ermöglichen. Für einige Prozessschritte existieren hierzu bereits Maschinen und Prozesse:

- Für die Formgebung der Hairpins kann der sequentielle Rohrbiegeprozess eingesetzt werden.
- Das Setzen der Hairpins geschieht im Musterbau meist manuell [4].
- Die Werkzeugkosten beim Einbringen der Hairpins in den Stator können durch den Einsatz eines Greifers mit Formbacken drastisch reduziert werden [5].

Für den Prozessschritt des Twistens der Hairpin-Enden wurde bereits die Prozessführung des sequentiellen Twistens von Hausmann *et al.* [6] vorgestellt, jedoch fehlt bislang die Überführung in ein robustes und industriell einsetzbares Maschinenmodul. In diesem Beitrag wird dieses Maschinenmodul vorgestellt, das auf einem Industrieroboter, einem einfachen Twistwerkzeug sowie verschiedenen Sensoren zur Prozessüberwachung basiert. Darüber hinaus wird das Steuerungskonzept präsentiert, welches eine flexible und zuverlässige Durchführung des Twistprozesses ermöglicht.

2 Stand der Technik

Das Twisten der Hairpin-Wicklung stellt einen wesentlichen Prozessschritt in der Fertigung von Hairpin-Statoren dar [6]. Das Ziel des Twistens besteht darin, die Enden der Hairpins so zu formen, dass sich paarweise Kontaktstellen bilden, die anschließend verschweißt werden können, um den dem Wickelschema entsprechenden Stromfluss zu ermöglichen. Die Umformung der Drähte erfolgt durch eine überlagerte tangential und axiale Bewegung. Die tangential Richtung der Umformung weist dabei eine lagenweise abwechselnde Richtung auf. Die hierfür erforderliche Kraft

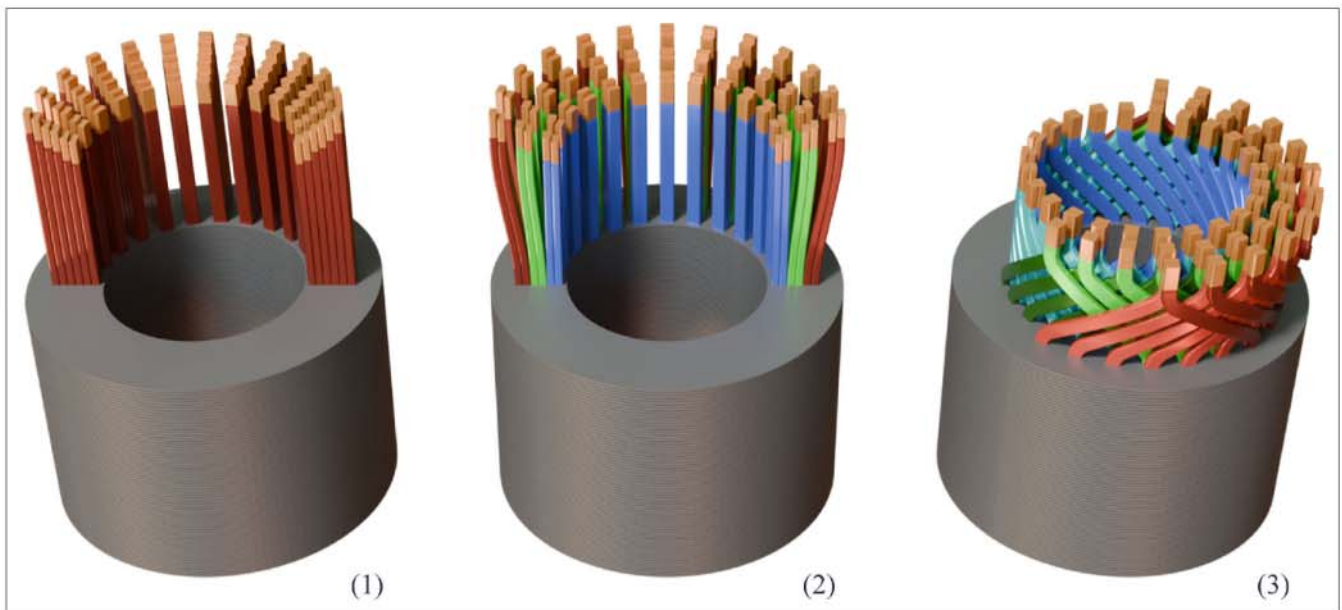


Bild 1 Schnittdarstellung eines Hairpin-Stators mit (1) gesetztem Ausgangszustand und den Prozessschritten (2) Aufweiten (Separieren) und (3) Twisten (Verschränken). Grafik: wbk

wird am abisolierten Teil des Drahtes durch ein Werkzeug eingeleitet, während sich der restliche Draht frei verformen kann [7]. Das Ergebnis des Twistens hat dabei einen maßgeblichen Einfluss auf den nachfolgenden Schweißprozess [8].

2.1 Simultanes Twisten

Das simultane Twisten ist der in der Großserienfertigung von Hairpin-Statoren eingesetzte Prozess. Hierbei werden alle Hairpin-Enden eines Stators gleichzeitig umgeformt. Dem Twistprozess wird dabei der Aufweitprozess vorgeschaltet, im Zuge dessen die Enden der Drähte paarweise separiert werden, um das Aufsetzen der Twistwerkzeuge zu ermöglichen (siehe **Bild 1**).

Um die zuvor beschriebene abwechselnde rotatorische Richtung der Umformung der Drähte in allen Drahtlagen eines Stators simultan auszuführen, werden konzentrisch geschachtelte Twistwerkzeuge axial auf die Hairpin-Enden aufgesetzt. Entsprechende Taschen in den Werkzeugen nehmen dabei alle Hairpin-Enden einzeln auf und ermöglichen so die simultane Umformung der Drähte durch eine überlagerte Dreh- und Translationsbewegung des Werkzeugsatzes [7].

Ein solcher Werkzeugsatz ist mit den erkennbaren Taschen in **Bild 2** dargestellt.

Der Aufbau einer simultanen Twistanlage ist neben der Aufnahme des Stators wesentlich durch die Ermöglichung der überlagerten, konzentrischen Twistbewegung geprägt. Die geschachtelten Twistwerkzeuge sind dabei über Hohlwellen mit separaten Antrieben verbunden. Durch die verschiedenen Durchmesser der Drahtlagen ergeben sich zudem unterschiedliche axiale Zustellwege für die einzelnen Werkzeuge [7].

In Abhängigkeit des spezifischen Anlagenkonzepts besteht die Möglichkeit, die Werkzeuge mit zusätzlichen Antrieben so zu konfigurieren, dass eine unabhängige axiale Verfahrbarkeit gewährleistet ist. Alternativ wird der Stator während der Umformbewegung axial zugestellt. Die unterschiedlichen Zustellwege der Werkzeuge werden dabei durch einen schrittweise verzögerten Start der Rotation der einzelnen Werkzeuge kompensiert. Ein



Bild 2 Demontierter Werkzeugsatz zum simultanen Twisten eines Hairpin-Stators mit vier Drahtlagen. Die vier topfförmigen Werkzeuge werden für den Prozess konzentrisch geschachtelt. Foto: wbk

solches Maschinenkonzept ist in **Bild 3** schematisch für einen Stator mit vier Drahtlagen dargestellt.

Ein signifikanter Vorteil des simultanen Twistens liegt in der hohen Produktivität, durch die zeitgleiche, simultane Umformung aller Drähte. Dies resultiert in geringen Stückkosten bei großen Produktionsvolumina. Demgegenüber stehen jedoch die hohen Werkzeugkosten aufgrund des komplexen Werkzeugsatzes, die mangelnde Flexibilität bei Designänderungen und die aufwendige Anlagenmechanik zur Ermöglichung der überlagerten Bewegungen [6].

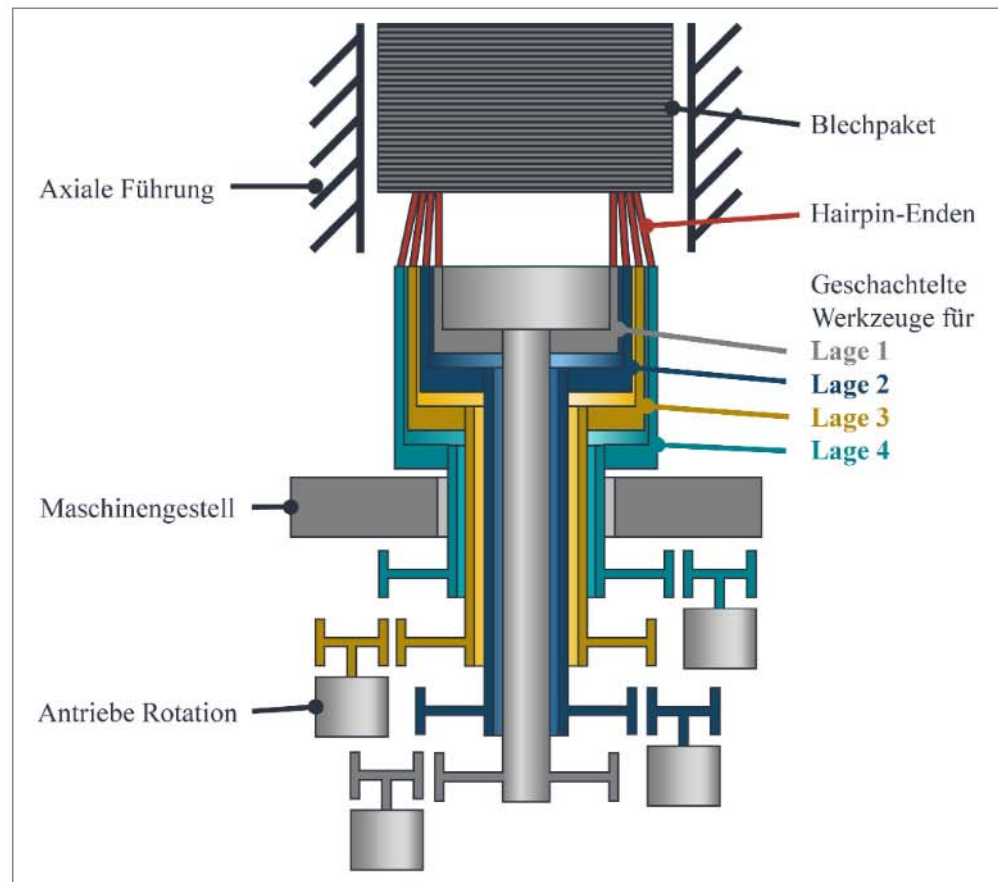


Bild 3 Schematischer Aufbau einer simultanen Twistanlage mit konzentrisch geschachtelten Twistwerkzeugen, hier mit axialer Zustellung des Stators. Grafik: wbk



Bild 4 Twistwerkzeug zum sequentiellen Twisten eines einzelnen Hairpin-Drahtes. Das Drahtende wird aus Pfeilrichtung durch einen prismatischen Kanal im Werkzeug aufgenommen. Grafik: wbk

2.2 Sequentielles Twisten

Das sequentielle Twisten stellt in vielerlei Hinsicht das Gegenstück zum simultanen Twisten dar. Anstatt eine simultane Verformung aller Hairpin-Enden eines Stators vorzunehmen, erfolgt die Umformung der Drähte in diesem Fall schrittweise. In der Folge wird das Twistwerkzeug erheblich vereinfacht, da nur noch ein einzelner Draht aufgenommen werden muss. Ein einfaches Twistwerkzeug ist in **Bild 4** dargestellt und wurde mittels additiven Verfahren (PBF-LB) aus Werkzeugstahl hergestellt. Das trapezförmige Ende des Werkzeugs ermöglicht dessen Aufnahme in die Maschine, während der filigrane, polierte vordere Teil mit dem Draht interagiert.

Das vereinfachte Werkzeug ermöglicht eine signifikante Reduzierung der Werkzeugkosten auf wenige hundert Euro. Darüber hinaus ist das Werkzeug bei verschiedenen Stator designs anwendbar, da es lediglich an die Drahtgeometrie angepasst sein muss. Dies ermöglicht eine hohe Flexibilität bei Designänderungen und

eine kostengünstige Fertigung im Musterbau und in Kleinserien. Demgegenüber steht jedoch die signifikant längere Zykluszeit, die hauptsächlich von der Anzahl der Drähte im Stator abhängt. Das nachfolgend präsentierte Maschinenkonzept ermöglicht die Realisierung von Zykluszeiten von etwa 10 Sekunden pro Draht. Bei einem Stator mit 48 Nuten und acht Lagen entspricht dies einer Zykluszeit von 64 Minuten. Darüber hinaus erfordert das sequentielle Twisten eine deutlich komplexere Prozessführung, um Kollisionen zwischen den Drähten zu vermeiden. Die für die Prozessplanung erforderlichen Algorithmen wurden bereits durch Hausmann et al. in [6] und [7] vorgestellt.

3 Anforderungen an ein Maschinenmodul zum sequentiellen Twisten

Für die Durchführung des sequentiellen Twistprozesses werden spezifische Anforderungen an das Maschinenmodul gestellt. Diese ergeben sich zum einen aus den Prozessanforderungen des

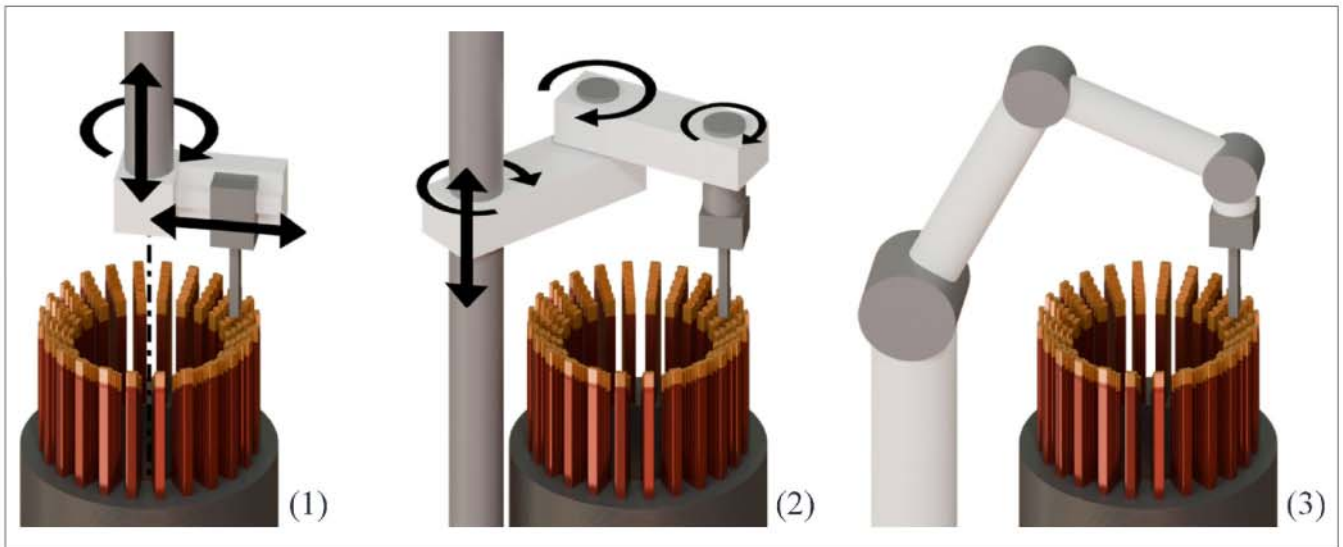


Bild 5 Verschiedene Kinematiken zur Positionierung des Twistwerkzeugs: (1) Minimalkinematik, (2) SCARA-Kinematik, (3) Vertikal-Knickarmkinematik.
Grafik: wbk

Twistens selbst und zum anderen aus den Rahmenbedingungen der Fertigung von Hairpin-Statoren. Die wichtigsten Anforderungen sind im Folgenden zusammengefasst:

- **Flexibilität:** Das Maschinenmodul muss dazu befähigt sein, unterschiedliche Stator-Designs mit unterschiedlichen Drahtanzahlen und -geometrien zu verarbeiten. Das Twistwerkzeug muss mindestens in radialer, tangentialer und axialer Richtung verfahrbar sein.
- **Präzision:** Um die Positionstoleranzen der Drahtenden für den nachfolgenden Schweißprozess einzuhalten, ist eine hohe Positionier- und Wiederholgenauigkeit des Maschinenmoduls erforderlich. Die Steifigkeit des Aufbaus sowie die Genauigkeit der Sensorik sind dabei von entscheidender Bedeutung.
- **Robustheit:** Insbesondere das Einfädeln der Drahtenden in das Twistwerkzeug ist kritisch für die Prozessstabilität und muss über geeignete Sensorik überwacht werden.
- **Produktivität:** Trotz der sequentiellen Arbeitsweise muss das Maschinenmodul eine akzeptable Zykluszeit im Kontext des Musterbaus aufweisen und dahingehend optimiert werden.
- **Kosten:** Das Maschinenmodul soll kostengünstig in der Anschaffung und im Betrieb sein, um den Einsatz im Musterbau und in Kleinserien wirtschaftlich zu gestalten.

4 Mechanischer Aufbau des Maschinenmoduls

4.1 Kinematik der Werkzeugpositionierung

Die Kinematik zur Positionierung des Twistwerkzeugs stellt den zentralen Bestandteil des Maschinenmoduls dar. Um die beschriebenen Anforderungen an Flexibilität und Präzision zu erfüllen, ist der Einsatz von NC-gesteuerten Achsen unabdingbar. Der minimale Aufbau besteht aus zwei linearen und einer rotatorischen Achse, welche die drei notwendigen Freiheitsgrade radial, axial und tangential relativ zum Stator abbilden. Zur Nutzung einer weiterverbreiteten Kinematik kann alternativ auch eine Portalkinematik mit einer rotatorischen Handachse oder eine SCARA-Kinematik eingesetzt werden. Diese weisen dieselben Freiheitsgrade auf. Die verschiedenen möglichen Kinematiken sind in **Bild 5** dargestellt.

In der Praxis hat sich gezeigt, dass es vorteilhaft ist, das Twistwerkzeug in allen sechs Freiheitsgraden positionieren und orientieren zu können. Durch ein gezieltes Verkippen des Werkzeugs lässt sich vorhandenes Spiel zwischen Draht und Werkzeug ausgleichen. Dieses Spiel entsteht, weil der prismatische Kanal im Twistwerkzeug konstruktionsbedingt nicht exakt der Drahtgeometrie entspricht, da seine Abmessungen auf den Draht inklusive Isolation ausgelegt sind. Beim Einfädeln wird jedoch in der Regel die abisolierte, schmalere Drahtspitze verwendet. Aus diesem Grund kommt im vorgestellten Maschinenmodul ein Vertikal-Knickarmroboter mit sechs Achsen zum Einsatz, der somit die höchste Flexibilität bei der Werkzeugpositionierung bietet.

4.2 Positionierung des Stators

Um die Kräfte der Umformbewegungen des Twistprozesses aufzunehmen, ist eine feste Einspannung des Stators erforderlich. Aufgrund der Hochvoltisolation der Wicklung, die eine hohe Empfindlichkeit aufweist, erfolgt die Einspannung über das Blechpaket. Die Einspannung kann wahlweise am inneren oder äußeren Durchmesser des Stators über eine mechanische Klemmung erfolgen. Von entscheidender Bedeutung ist hierbei die präzise Ausrichtung des Stators, sowohl in Bezug auf die konzentrische als auch auf die axiale Ausrichtung. Die axiale Ausrichtung ist am äußeren Durchmesser durch Absätze in den Klemmböcken besonders einfach, weshalb diese Möglichkeit bevorzugt wird. Im vorgestellten Maschinenmodul findet ein Vierbackenfutter mit manueller Betätigung Anwendung, alternativ ist auch eine pneumatische oder motorische Betätigung möglich.

Sofern die Absolutgenauigkeit des eingesetzten Roboters unzureichend ist, kann eine zusätzliche Positionierung des Stators auf einem Rundtisch erforderlich sein. Diese Konfiguration ermöglicht die Ausrichtung des Stators, sodass sich der zu bearbeitende Draht stets an derselben Stelle im Arbeitsbereich des Roboters befindet. Als Folge ist der Roboter in der Lage, im Bereich seiner Wiederholgenauigkeit zu arbeiten, die in der Praxis zumeist deutlich besser ist.

Ist die Absolutgenauigkeit des Roboters hingegen ausreichend, kann auf den Rundtisch verzichtet werden. Dies hat eine Re-

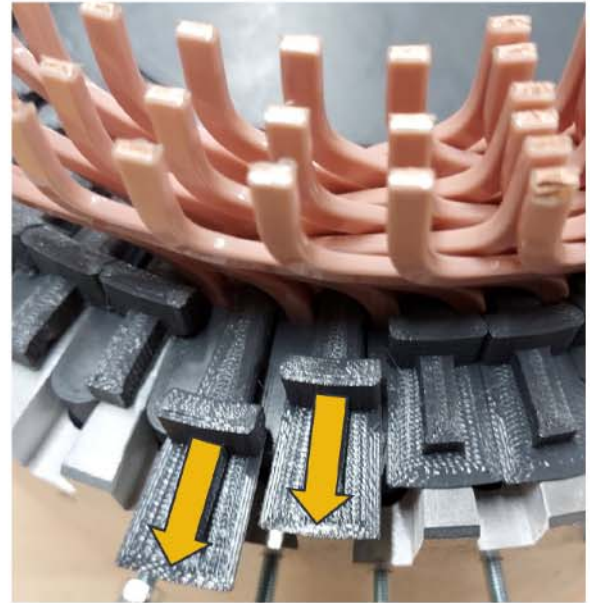
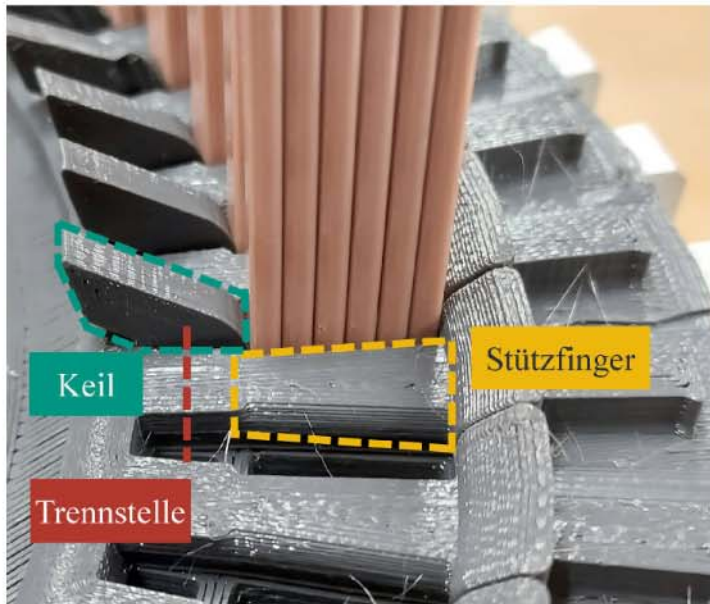


Bild 6 Additiv gefertigter Stützfingerring zum Schutz aller Drähte eines Hairpin-Stators während des Twistprozesses. Links: Stützfinger mit eingesetztem Keil, Rechts: Entnahme der Stützfinger. Grafik: wbk

duktion der Zykluszeit zur Folge und führt insbesondere zu einer höheren Steifigkeit des Systems. Die erforderliche Absolutgenauigkeit ist dabei insbesondere von der Dicke der Drähte des Stators abhängig. Für dünnere Drähte ist demnach ein genauerer Roboter zum zuverlässigen Einfädeln erforderlich. Als Orientierungswert kann eine Absolutgenauigkeit zwischen $\pm 0,1$ mm und $\pm 0,3$ mm angenommen werden.

4.3 Stützfingerkonzept

Um zu verhindern, dass die Isolationsschicht beim Twistprozess durch die scharfen Kanten des Blechpakets beschädigt wird, müssen die Drähte während des Prozesses durch Stützfinger geführt werden. Beim simultanen Twisten sind diese Stützfinger üblicherweise aus poliertem Stahl und werden über eine Kurvenscheibe vor dem Twistprozess zwischen die Drähte gefahren. Auch hierfür fallen hohe Werkzeugkosten an, die für den flexiblen, sequentiellen Prozess nicht akzeptabel sind.

Wird der Stator auf einem Rundtaktisch positioniert, kann ein zustellbares Stützfingerpaar den momentan zu bearbeitenden Draht abstützen. Die Stützfinger werden dann zum Weitertakten des Stators zurückgezogen. Dieses Konzept wurde bereits durch Hausmann et al. in [6] vorgestellt.

Wird hingegen auf einen Rundtaktisch verzichtet, ist es erforderlich, dass alle Drähte des Stators gleichzeitig durch Stützfinger geschützt werden. Hierfür wurde ein additiv gefertigtes Stützfingerkonzept entwickelt (siehe Bild 6). Das Konzept besteht aus einem Stützfingerring, der vor Prozessbeginn axial auf den Stator aufgesetzt wird und alle Drähte gleichzeitig schützt. Zudem wird durch Keile eine nutweise radiale Stützung der Drähte erzielt. Nach Abschluss des Prozesses können die Stützfinger nach Entfernung der Keile am inneren Durchmesser abgetrennt und nach außen aus dem Stator entnommen werden. Der Stützfingerring ist folglich nicht wiederverwendbar, was jedoch aufgrund der geringen Fertigungskosten durch filamentbasierte 3D-Druckverfahren für den Musterbau vertretbar ist.

5 Messsysteme zur Prozessüberwachung

5.1 Optische Detektion der Position der Drahtenden

Für die Robustheit des sequentiellen Twistprozesses stellt das Einfädeln der Drahtenden in das Twistwerkzeug den kritischsten Schritt dar. Wird das Einfädeln lediglich zu 99 % erfolgreich ausgeführt, resultieren bei einem konventionellen Stator, welcher über 384 Drähte verfügt, drei bis vier erwartete Kollisionen. Dies führt zum Stillstand des Prozesses und in der Folge zur Unbrauchbarkeit des Stators.

Die exakte Kenntnis der Position der Drahtenden vor dem Einfädeln in das Twistwerkzeug ist somit von essentieller Bedeutung. Da die Messzeit zur Positionsbestimmung des Drahts direkt in die Gesamtzykluszeit eingeht, ist die Verwendung eines schnellen, aber dennoch sicheren Messverfahrens erforderlich. Dreidimensionale Sensoren, wie etwa Laserscanner oder 3D-Kameras, erweisen sich in diesem Zusammenhang als unzulänglich, insbesondere in Anbetracht der langen Messzeiten und der aufwendigen Datenverarbeitung.

In diesem Kontext stellt ein Kamerasystem in Kombination mit einer entsprechenden Bildverarbeitung den sinnvollsten Kompromiss dar. Die Detektion der Drahtenden kann dabei durch den in [9] vorgestellten algorithmischen Ansatz erfolgen oder durch den Einsatz von Deep-Learning-basierten Verfahren, wie beispielsweise Vision-Transformern. In der praktischen Anwendung haben sich Letztere als besonders robust gegenüber Abweichungen der Beleuchtungsbedingungen und Drahtgeometrien erwiesen.

Für eine homogene Beleuchtung der Drahtenden wird eine Ringlichtquelle um den Stator herum eingesetzt. Es ist jedoch sicherzustellen, dass das Twistwerkzeug im Zugriff auf die Drahtenden nicht behindert wird. Wie bereits in [9] beschrieben, erfolgt die Installation der Kamera mit einem möglichst großen Abstand über dem Stator, um Parallaxeffekte zu minimieren und eine erhöhte Tiefenschärfe zu erzielen.

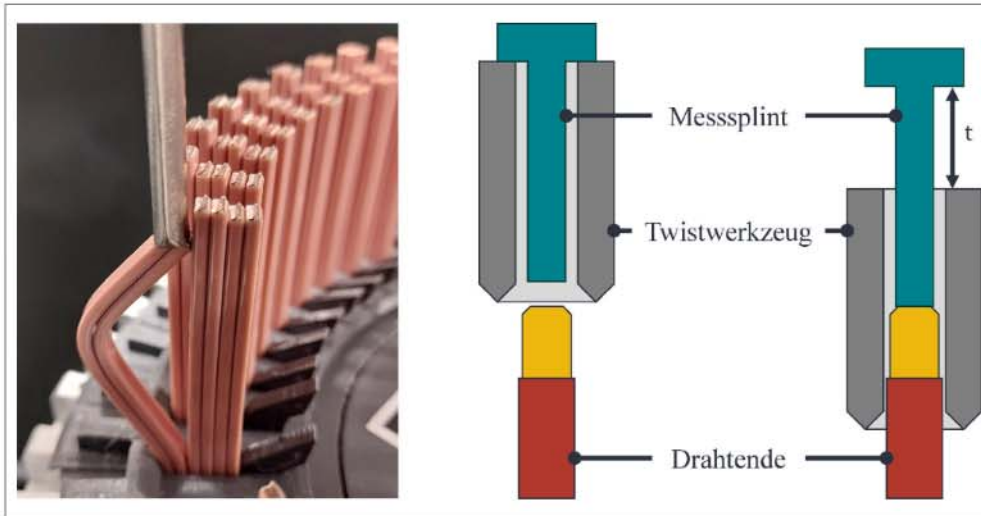


Bild 7 Links: Folge eines fehlerhaft eingefädelten Drahtes. Rechts: Messprinzip des Einfädelsensors. Grafik: wbk

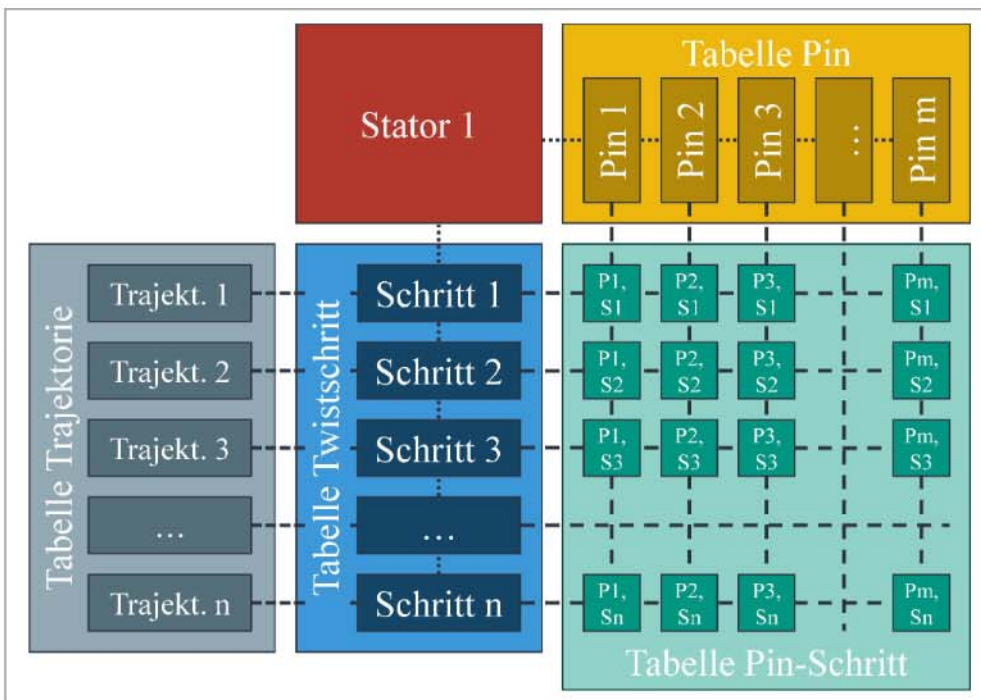


Bild 8 Struktur der relationalen Datenbank zur Verwaltung der Prozessparameter und Prozessdaten des sequentiellen Twistprozesses. Grafik: wbk

5.2 Überwachung des Einfädelvorgangs

Um trotzdem auftretende Fehler beim Einfädeln der Drähte frühzeitig zu erkennen, ist eine zusätzliche Überwachung des Einfädelvorgangs sinnvoll. Das zugehörige Messprinzip eines Einfädelsensors sowie ein mögliches Fehlerbild sind in **Bild 7** dargestellt.

Zu diesem Zweck wird ein federgelagerter Messsplint in das Twistwerkzeug eingesetzt, der beim Einfädeln des Drahtes nach oben ausgelenkt wird. Die Detektion dieser Auslenkung kann beispielsweise unter Verwendung eines induktiven Näherungssensors erfolgen, sofern lediglich die Überwachung mittels eines digitalen Signals erforderlich ist. Eine alternative Option stellt der Einsatz eines optischen oder taktil agierenden Wegsensors dar, der die Auslenkung des Messsplints quantifizieren kann. Da die Positionierung des Werkzeugs durch die Kinematik zum Zeitpunkt des Einfädelns bekannt ist, kann so zusätzlich zur Überwachung des Einfädelvorgangs auch die genaue Höhe der Drahten-

den bestimmt werden, die aus der kamerabasierten Bildverarbeitung nicht hervorgeht. Die beobachtete Präzision des Systems liegt hierbei im Bereich von $\pm 0,1$ mm.

6 Steuerungskonzept

6.1 Bereitstellung von Prozessparametern und Aufzeichnung von Prozessdaten

Der sequentielle Twistprozess erfordert eine Vielzahl von Prozessparametern, die für jeden Stator individuell festgelegt sind. Der Begriff wird in diesem Kontext umfassender definiert und umfasst neben den klassischen Prozessparametern, wie beispielsweise der Vorschubgeschwindigkeit oder der Werkzeuglänge, auch die Positionen der Drahtenden, die Twist-Reihenfolge sowie die dafür notwendigen Werkzeugtrajektorien. Zur Strukturierung dieser umfangreichen Anzahl an Parametern wird eine zentrale, relationale Datenbank genutzt. Ihre Struktur ist in **Bild 8** dargestellt.

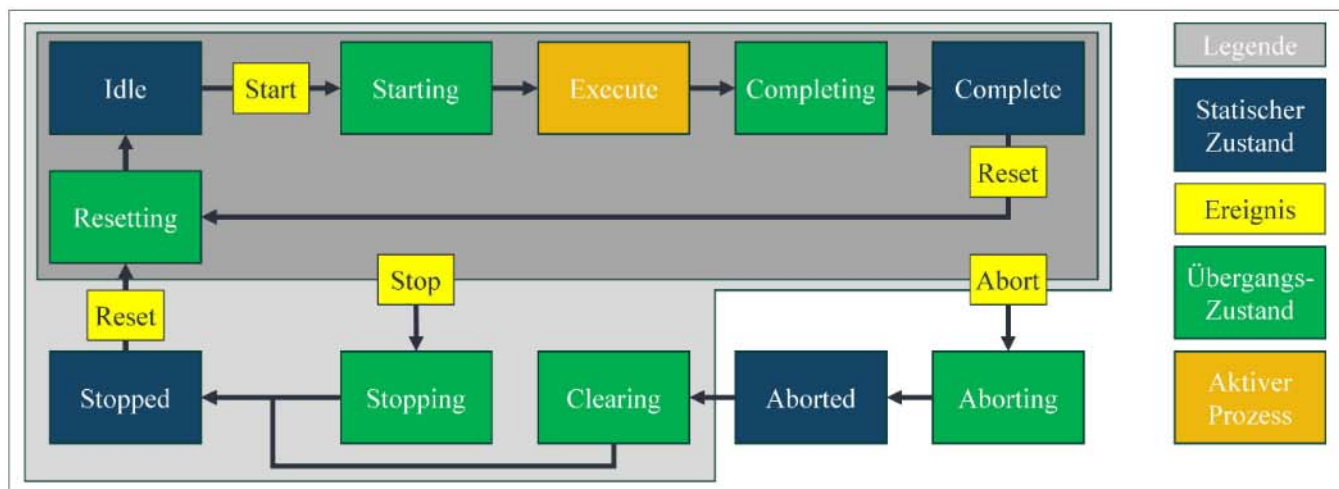


Bild 9 Vereinfachtes Zustandsdiagramm des PackML-Standards zur Ablaufsteuerung in Anlehnung an [10]. Grafik: wbk

Den Grundstein bildet eine Tabelle mit den Stammdaten der Statoren, die globale Daten des Stators enthält, wie:

- Die Anzahl der Nuten und Lagen
- Der Durchmesser des Blechpakets
- Die Drahtgeometrie
- Werkzeugdaten

Über eine „eine-zu-viele“-Beziehung sind jedem Stator dann die individuellen Drähte, hier „Pins“ genannt, zugeordnet. Hinterlegte Daten sind hier beispielsweise:

- Der Index des Pins
- Der Index der Nut und Lage in der sich der Pin befindet
- Die Länge des Drahtes

Zusätzlich sind jedem Stator die Prozessdaten zugeordnet, die zur geordneten Durchführung der Twist Schritte notwendig sind. Hierzu gehören insbesondere:

- Der Index des aktuellen Schritts (Reihenfolge)
- Der Index des zu bearbeitenden Pins
- Parameter über die anzuwendende Twiststrategie

Aus den Tabellen der Pins und der Twist Schritte kann nun eine Matrix der Prozessdaten gebildet werden, mit der sich jedem Pin zu jedem Prozessschritt entsprechende Prozessdaten zuordnen lassen. Dies ist insbesondere für die Aufzeichnung von Prozessdaten während des Twistprozesses relevant, wie beispielsweise:

- Die Soll-Position des Drahtendes
- Die durch die Bildverarbeitung gemessene Ist-Position des Drahtendes
- Die durch die Einfädelsensorik gemessene tatsächliche Länge des Drahtes

Abschließend ist über eine weitere Tabelle jedem Twist Schritt eine Trajektorie, bestehend aus einzelnen Wegpunkten, zugeordnet, die zum jeweiligen Twist Schritt durch die Kinematik ausgeführt wird.

6.2 Ablaufsteuerung des sequentiellen Twistprozesses

6.2.1 Äußere Schrittkette zur Maschinensteuerung

Wie in nahezu jedem Prozess müssen auch beim sequentiellen Twisten verschiedene Prozessschritte in einer definierten Reihenfolge ausgeführt werden. In der industriellen Steuerungstechnik hat sich für diesen Zweck die Verwendung von ereignisgesteuerten Zustandsmaschinen (State Machines) bewährt. Diese erlauben eine eindeutige und strukturierte Ablaufsteuerung.

Im Sinne der Standardisierung und Modularisierung wurde im hier präsentierten Maschinenmodul der industriell verbreitete PackML-Standard (Packaging Machine Language, ISA-TR88.00.02) zur Realisierung der Zustandsmaschine verwendet. Eine detaillierte Erläuterung der Anwendung dieses Standards kann dem Werk [10] entnommen werden. Der hier verwendete, vereinfachte Aufbau der PackML-Zustandsmaschine ist in Bild 9 dargestellt.

Wird das Maschinenmodul eingeschaltet, so wechselt es über den Resetting-Zustand in den Idle-Zustand. Dabei werden alle für den Prozess notwendigen Initialisierungen durchgeführt, wie beispielsweise das Laden der Prozessparameter aus der Datenbank. Der Prozess kann durch den Bediener vom Idle-Zustand aus gestartet werden, wodurch in den Starting-Zustand gewechselt wird. In diesem Zustand wird die innere Schrittkette für den Prozessablauf des Twistens initialisiert. Im nachfolgenden Execute-Zustand wird der eigentliche Prozess ausgeführt, wie im nachfolgenden Kapitel 6.2.2 beschrieben. Wird der Prozess erfolgreich abgeschlossen, so wechselt die Zustandsmaschine in den Zustand Completing. Wird der Prozess vorzeitig vom Anwender abgebrochen, so wechselt die Zustandsmaschine in den Zustand Stopping. Tritt ein schwerwiegender Fehler auf, so wechselt die Zustandsmaschine in den Zustand Aborting. In diesen Zuständen werden abschließende Tätigkeiten durchgeführt, wie beispielsweise das Speichern der Prozessdaten in der Datenbank. Im Anschluss kann der Bediener die Maschine wieder in den Idle-Zustand versetzen.

6.2.2 Innere Schrittkette zur Prozesssteuerung

Innerhalb des Execute-Zustands der äußeren Schrittkette wird der eigentliche sequentielle Twistprozess durch eine weitere Zustandsmaschine gesteuert. Die folgenden Schritte sind in der vorgegebenen Reihenfolge auszuführen:

1. Bildaufnahme durch die Kamera.
2. Vermessung der Orientierung des Stators.
3. Vermessung der Position der Drahtenden.
4. Generierung der Werkzeugtrajektorie (NC-Programm) für den aktuellen Draht unter Berücksichtigung der gemessenen Drahtposition.
5. Positionierung des Rundtakttsch, falls vorhanden.
6. NC-Programmabarbeitung durch die Kinematik, beginnend mit dem Einfädeln des Drahtendes in das Twistwerkzeug.

7. Stopp des Einfädelvorgangs auf definierter Höhe und Überprüfung der Drahthöhe durch die Einfädelsensorik. Prozessabbruch bei Abweichungen außerhalb der definierten Toleranz.
8. Umformung des Drahtes durch das Twistwerkzeug nach der vorgegebenen Trajektorie.
9. Rückführung des Twistwerkzeugs in die Ausgangsposition, dabei Freifahren der Sichtlinie für die Kamera auf den Stator.
10. Inkrementieren des Prozessschritts und Wiederholung ab Schritt 1.

7 Beschreibung des experimentellen Aufbaus

Zur Validierung der Funktionalität des vorgestellten Maschinenmoduls sowie zur Prüfung des Zusammenspiels der einzelnen Hard- und Softwarekomponenten wurde ein experimenteller Aufbau realisiert. Dieser ist in **Bild 10** dargestellt.

Den Kern des Aufbaus bildet ein Industrieroboter (Comau „NJ130“ mit Sinumerik-Steuerung), der das Twistwerkzeug in allen sechs Freiheitsgraden positionieren und orientieren kann. Dies resultiert in erweiterten Möglichkeiten bei der Bearbeitung der Drähte. Der Stator wird auf einem manuell betätigten Vierbackenfutter eingespannt, welches wiederum auf einem servobetriebenen Rundtaktisch montiert ist.

Die Kamera zur optischen Detektion der Drahtenden ist mit einem Abstand von etwa 1,6 m über dem Stator angebracht und damit deutlich außerhalb des Arbeitsbereichs des Roboters. Zur gleichmäßigen Beleuchtung der Drahtenden wird eine Ringlichtquelle eingesetzt. Empirische Untersuchungen haben ergeben, dass sich eine rote Lichtfarbe insbesondere im Zusammenspiel mit Kupferdrähten als vorteilhaft erweist.

Das Twistwerkzeug ist mit einem Einfädelsensor ausgestattet, der wiederum mit einem Linearpotentiometer verbunden ist. Das Linearpotentiometer misst die Auslenkung eines federgelagerten Messsplints und ist direkt mit der SPS des Roboters verbunden. Somit kann eine unmittelbare Auswertung des Sensorsignals im Prozessablauf erfolgen.

Die Implementierung der übergeordneten PackML-Schrittliste sowie der inneren Schrittliste zur Prozesssteuerung erfolgt in Python auf einem Edge-Computer. Die Bildverarbeitung zur Detektion der Drahtenden erfolgt ebenfalls in Python und nutzt den Vision-Transformer RF-DETR [11]. Als Datenbanksystem findet die Open-Source-Implementierung PostgreSQL [12] Anwendung.

Der Datenaustausch zwischen Edge-Computer und Robotersteuerung erfolgt über die Schnittstelle OPC-UA. Dabei wird der Robotersteuerung stets das aktuell zu bearbeitende NC-Programm übergeben. Die Überwachung der Drahthöhe ist dabei

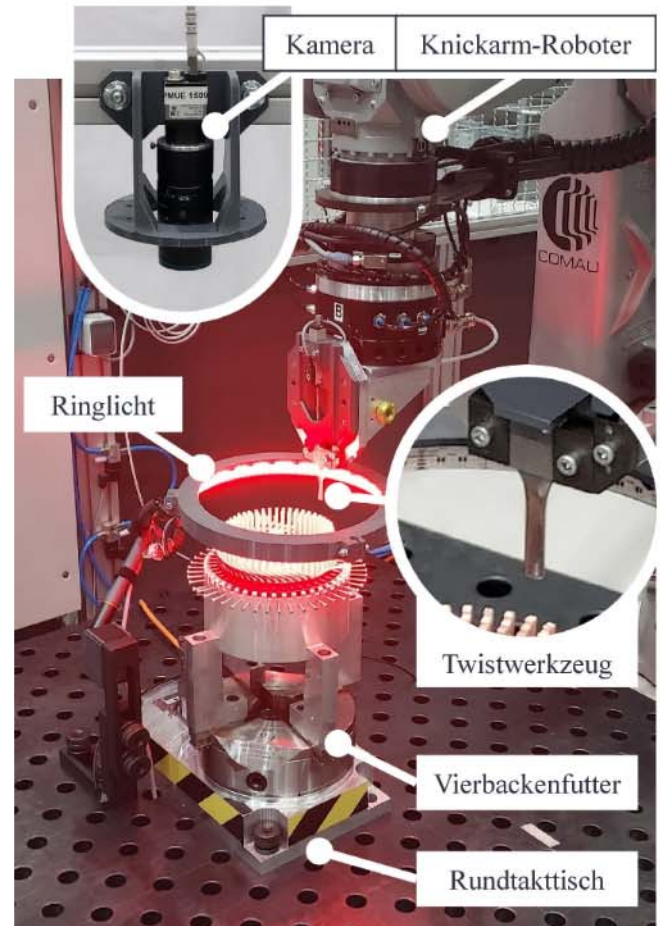


Bild 10 Experimenteller Aufbau des Maschinenmoduls zum sequentiellen Twisten von Hairpin-Statoren. Grafik: wbk

direkt im NC-Code implementiert. Nach Abschluss des Programms erfolgt seitens der Steuerung des Roboters die Meldung des Programmabschlusses sowie der gemessenen Drahtlänge an den Edge-Computer.

Mit dem beschriebenen experimentellen Aufbau konnte das Zusammenspiel der einzelnen Komponenten erfolgreich validiert werden. So wurden bereits mehrere vollständige Hairpin-Statoren mit dem sequentiellen Twistprozess bearbeitet. Die erzielte Zykluszeit betrug dabei etwa 10 Sekunden pro Draht. In **Bild 11** ist diese Zykluszeit zusätzlich nach den Schritten der Ablaufsteuerung aufgeschlüsselt. Bei einem Stator mit 48 Nuten und acht Lagen entspricht dies einer Gesamtzykluszeit von etwa 64 Minuten. Unter der Prämisse einer optimalen Auslastung des

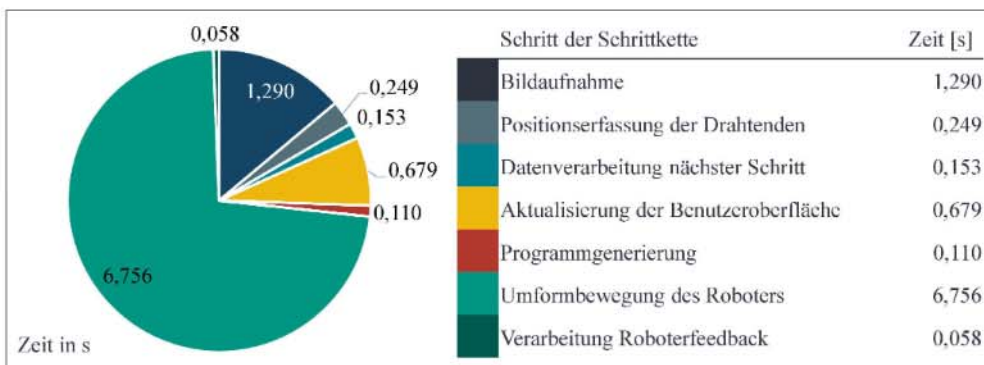


Bild 11 Aufschlüsselung der gemessenen Zykluszeit. Die gesamte Zykluszeit beträgt 9,295 Sekunden. Grafik: wbk

Maschinenmoduls lässt sich demnach die Kleinserienfertigung von circa 1 600 Hairpin-Statoren pro Jahr im Einschichtbetrieb als realistisch erachten, wobei dies unter voller Flexibilität bezüglich Designänderungen erfolgt.

Der einfache mechanische Aufbau des Maschinenmoduls ist zudem kostengünstiger als ein einzelner Werkzeugsatz zum simultanen Twisten. Somit ist der Einsatz im Musterbau schon ab dem ersten Stator wirtschaftlich.

Eine Beurteilung der erreichbaren Prozessqualität wird im Rahmen dieses Beitrags nicht vorgenommen, da diese nur untergeordnet durch das Anlagenkonzept beeinflusst wird. Von wesentlicher Relevanz ist in diesem Zusammenhang die Parametrierung des Prozesses sowie das daraus resultierende Programm und die Trajektorie des Roboters. Zudem sind verschiedene Ansätze zur Prozessregelung zu berücksichtigen, die derzeit noch Gegenstand laufender Forschungsaktivitäten sind.

8 Fazit und Ausblick

In diesem Beitrag wurde ein Maschinenmodul zum flexiblen, sequentiellen Twisten von Hairpin-Statoren vorgestellt. Der mechanische Aufbau basiert auf einem Industrieroboter zur Positionierung des Twistwerkzeugs, einem Rundtaktisch zur Positionierung des Stators sowie einem Stützfingerkonzept zum Schutz der Drähte während des Prozesses. Zur Prozessüberwachung werden eine kamerabasierte Bildverarbeitung zur Detektion der Drahtenden sowie ein Einfädelsensor im Twistwerkzeug eingesetzt. Die Steuerung des Prozesses erfolgt über eine PackML-basierte Zustandsmaschine.

Der experimentelle Aufbau des Maschinenmoduls ermöglichte die erfolgreiche Validierung der Funktionalität und des Zusammenspiels der einzelnen Komponenten. Erste Versuche mit vollständigen Hairpin-Statoren zeigen vielversprechende Ergebnisse hinsichtlich der Zykluszeit und der Prozessstabilität. Durch die geringen Kosten lässt sich das Maschinenmodul durch Vervielfältigung gut skalieren, um volatilen Stückzahlen gerecht zu werden.

Darüber hinaus besteht weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf, insbesondere in der Optimierung der Zykluszeit und der Präzision des Twistergebnisses. Interaktionen zwischen den Drähten während des Twistprozesses resultieren derzeit in Abweichungen, die eine händische Nacharbeit erforderlich machen. Um geeignete Kompensationsstrategien entwickeln zu können, sind tiefgreifende Untersuchungen des Drahtverhaltens während des Twistprozesses erforderlich.

Anmerkung: Die schriftliche Ausarbeitung dieser Veröffentlichung wurde durch generative KI unterstützt. Für alle Inhalte sind ausschließlich die Autoren verantwortlich.

Literatur

- [1] Arzillo, A. et al.: Challenges and Future opportunities of Hairpin Technologies. IEEE 29th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Delft/NL, 2020
- [2] Riedel, A. et al.: Challenges of the Hairpin Technology for Production Techniques. 21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Jeju/KOR, 2018
- [3] PEM RWTH Aachen: E-Motor-Produktion: PEM entwickelt Prozess für massive Einsparungen. Pressemeldung. Stand: 2026. Internet: <https://www.pem.rwth-aachen.de/go/id/brizs>. Zugriff am 03.02.2026
- [4] Gerner, J.; Wirth, F.; Fleischer, J.: Comparison of Rotary Draw Bending and Pipe Bending Processes in the Context of Hairpin Technology. 14th International Electric Drives Production Conference (EDPC), Regensburg/DE, 2024
- [5] Fraider, F.; Wustmann, E.; Fleischer, J.: Approach for Flexible Gripping and Sequential Alignment of Hairpin Baskets. 13th International Electric Drives Production Conference (EDPC), Regensburg/DE, 2023
- [6] Hausmann, L.; Wirth, F.; Fleischer, J.: Flexible Twisting Process of Stators with Hairpin Winding. 12th International Electric Drives Production Conference (EDPC), Regensburg/DE, 2022
- [7] Hausmann, L.; Wirth, F.; Fleischer, J.: Calculation of Process Parameters for the Twisting of Stators with Hairpin Winding. 13th International Electric Drives Production Conference (EDPC), Regensburg/DE, 2023
- [8] Kampker, A. et al.: Ex-Ante Process-FMEA for Hairpin Stator Production by Early Prototypical Production Concepts. 8th International Electric Drives Production Conference (EDPC), Regensburg/DE, 2018
- [9] Schröder, D. et al.: Image-Based Wire Position Detection for a Flexible Twisting Process of Hairpin Stators. 14th International Electric Drives Production Conference (EDPC), Regensburg/DE, 2024
- [10] Barbieri, G.; Battilani, N.; Fantuzzi, C.: A PackML-based Design Pattern for Modular PLC Code. IFAC-PapersOnLine Volume 48, Issue 10 (2015), S.178-183
- [11] Robinson, I.; Robicheaux, P.; Popov, M.: RF-DETR. Repository. Stand: 2026. Internet: <https://github.com/robflow/rf-detr>. Zugriff am 03.02.2026
- [12] P.G.D. Group: PostgreSQL. Database. Stand: 2026. Internet: <https://www.postgresql.org/>. Zugriff am 03.02.2026

FÖRDERHINWEIS

Die dargelegten Entwicklungen entstanden im Rahmen des Projekts „RoboTwist“ (Kennung: 16KN126523), das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWE) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert wird.

David Schröder, M.Eng. 
david.schroeder@kit.edu

Sebastian Henschel, M.Sc. 

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer 

wbk Institut für Produktionstechnik
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Kaiserstr. 12, 76131 Karlsruhe
www.wbk.kit.edu

LIZENZ



Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons
Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)