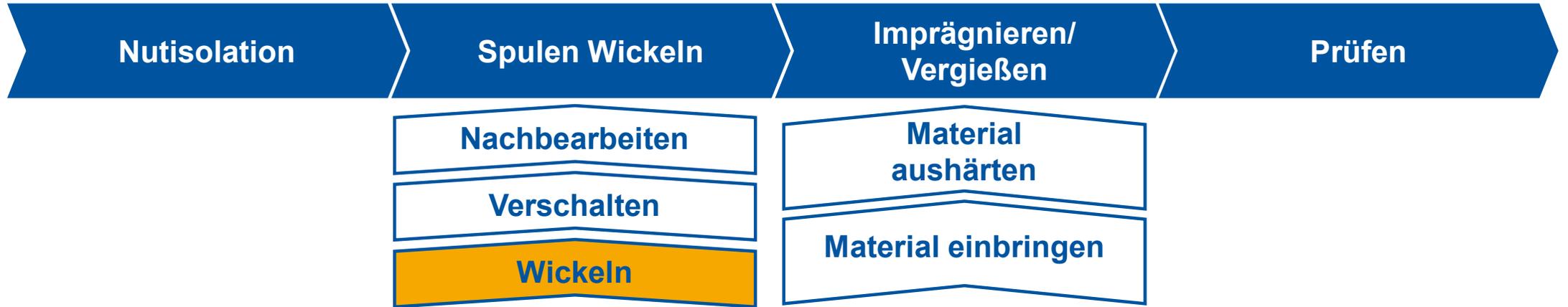


Prozesskette und Prozessalternativenmorphologie

Stator



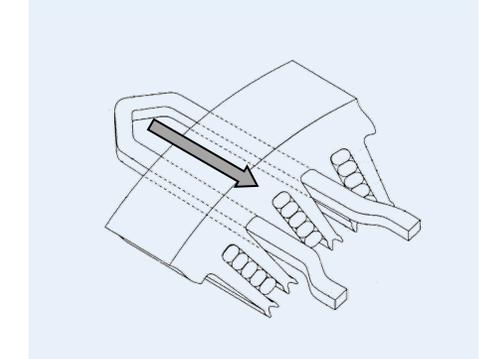
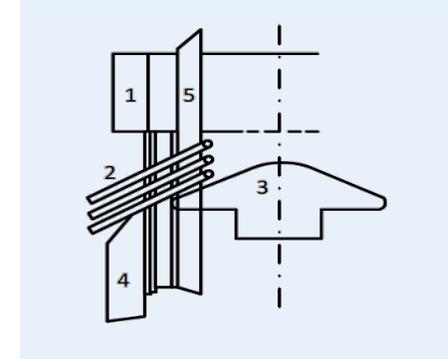
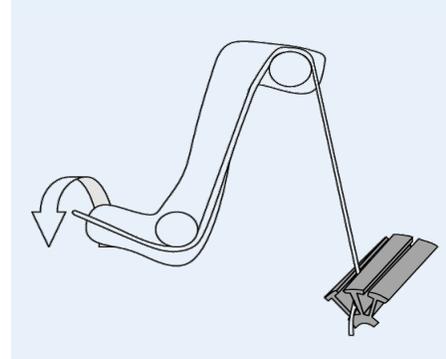
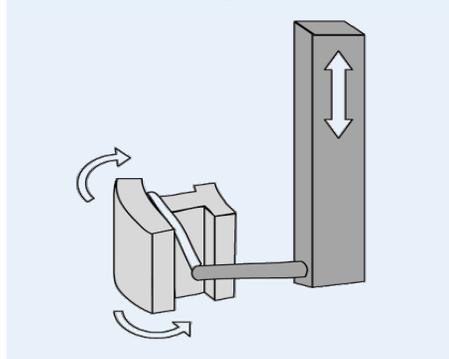
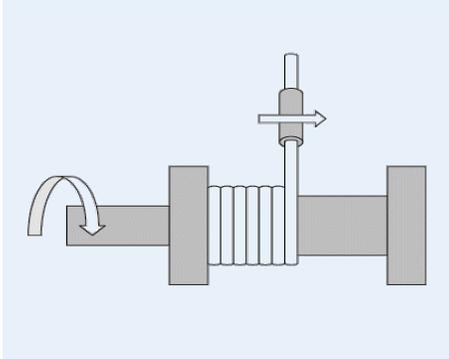
Statorproduktion						
Nutisolation	Folie	Dünnwand-spritzguss	Kunststoffformteile	Bandagieren von Formspulen	Pulverbeschichtung	Isolierpaste
Wickeltechnologie	Flyerwickeln	Nadelwickeln	Linearwickeln	Steckspulen	Roboterwickeln	Manuell bewickeln
Wicklungsapplikation	Direkt	Vorlegen und Einziehen		Formspulen einsetzen	Formstäbe einsetzen	
Wicklungsbearbeitung	Zwischen- und Endformen		Deckenschieber einbringen	Bandagieren	Draht schneiden	
Draht bündeln	Splice Technik		Power Wheel Technik		Warmverpressen von Blechhülsen	
Kontaktieren	Löten	Widerstands-schweißen	Lichtbogenschweißen	Steckverbindung	Schneid-Klemmverbindung	Laserschweißen
Wicklung erwärmen	Ofen		Widerstandserwärmung		Induktiv erwärmen	
Imprägnieren	Tränken	Träufeln	Vakuuminprägnierung	Vakuumdruckimprägnierung	Backlack	Spritzguss
Reinigen	Laserreinigen		Abblasen	Entgraten	Nachlackieren	

gebräuchlich
 nicht gebräuchlich



Direkte Wickelverfahren

Indirekte Wickelverfahren



Linearwickeln

- Rotation des Formkörpers
- Lineare Drahtverteilung
- Orthozyklische Drahtverlegung möglich

- + Kurze Taktzeit und gute Parallelisierbarkeit
- + Orthozyklische Drahtablage
- Nur konzentrierte Wicklung

Nadelwickeln

- Direktes Einlegen des Drahtes mittels Nadel
- Platz für Nadeldurchfahrt

- + Hohe Flexibilität
- + Definierte Drahtführung
- Füllfaktor durch Nadelgeometrie begrenzt
- Hohe Drahtbelastung

Flyerwickeln

- Rotierender Flyer um feststehenden Formkörper
- Abwurf des Drahtes

- + Kurze Taktzeit
- Nur konzentrierte Wicklung
- Wilde Wicklung

Flyerwickeln & Einziehen

- Externes Spulnwickeln
- Einziehen mit speziellem Werkzeug
- Nacharbeit und externe Kontaktierung

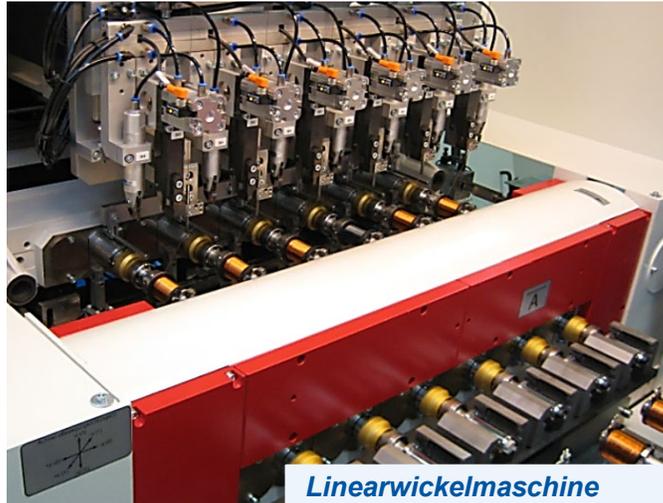
- + Verteilte Wicklung mögl.
- + Hohe Füllgrade
- Breiter Wickelkopf
- Hohe Drahtbelastung

Hairpin

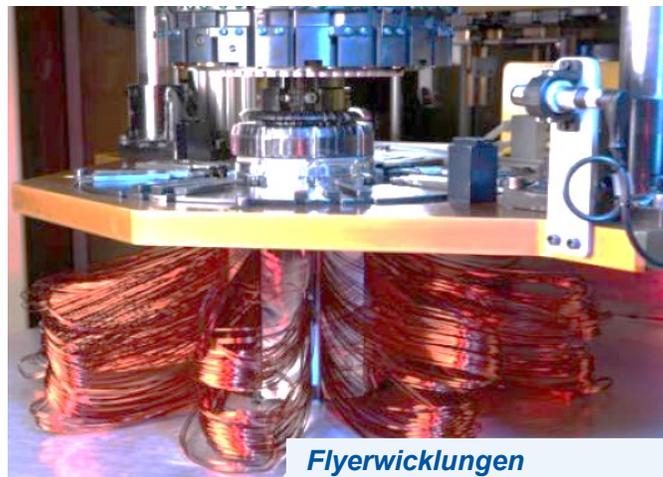
- Statorexternes Biegen
- Automatisiertes Einstecken der Drähte
- Biegen und Schweißen zur Kontaktierung

- + Hohe Füllgrade
- + Gute Automatisierbarkeit
- Aufwändige Prozesstechnik
- Wirbelstromeffekte

Bildquellen: Hagedorn, J. et al. (2016)_Handbuch der Wickeltechnik

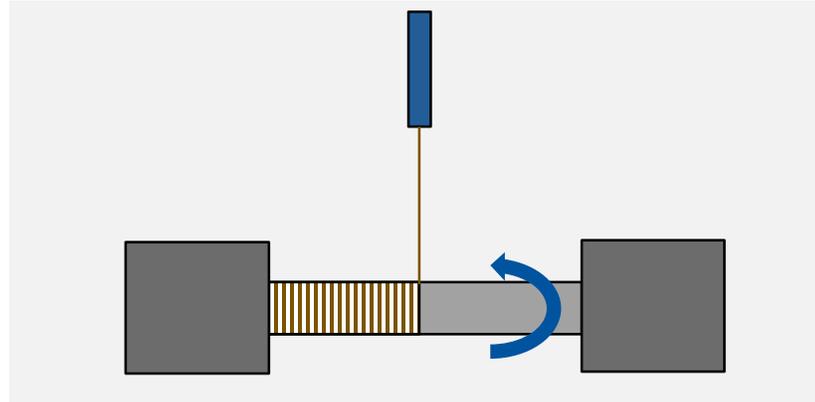


Linearwickelmaschine



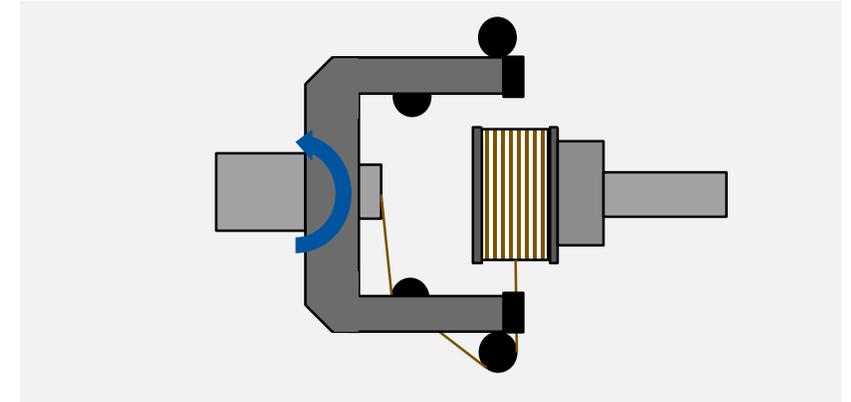
Flyerwicklungen

Linearwickeln

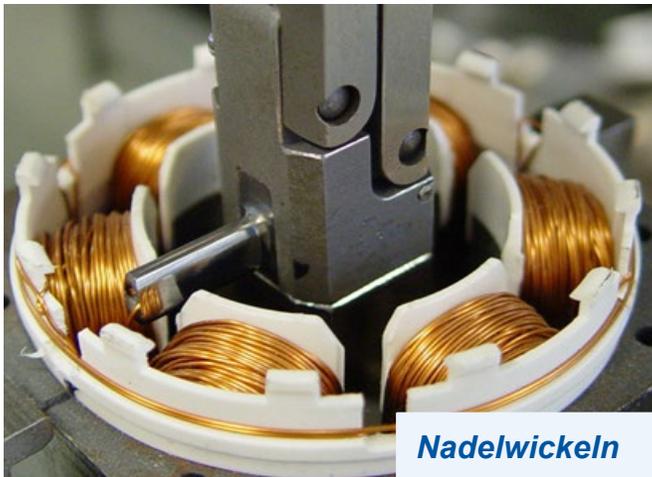


- Statorexternes Verfahren
- Terminierter Draht wird durch Rotation eines Formkörpers aufgespult
 - Verteilung des Drahtes im Spulenkörper erfolgt durch eine lineare Bewegung des Drahtführerröhrchens oder des Formkörpers
 - Für konzentrierte Wicklungen und Polketten geeignet

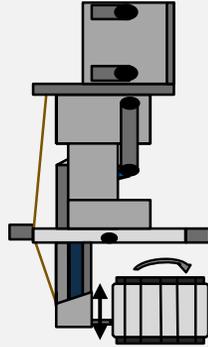
Flyerwickeln+Einziehen



- Statorexternes Verfahren
- Bis zu 5 Drähte werden gleichzeitig durch einen rotierenden Flyer auf einer Schablone abgelegt
- Durch ein komplexes Werkzeug werden die Drähte in den Stator eingezogen
- Hoher Nacharbeitsbedarf (Zwischenformen, Endformen, Bandagieren, Verschalten)

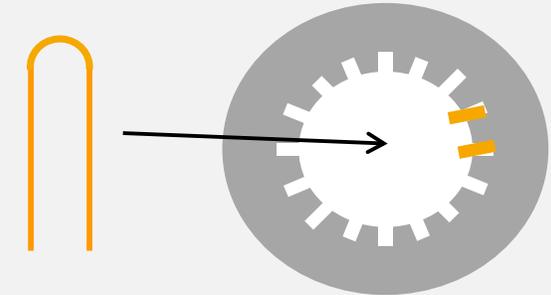


Nadelwickeln



- Direktes Verfahren
- Der terminierte Draht wird mit einer Nadel direkt in die Nut eingelegt
- Automatisiertes Verschalten möglich
- Kupferfüllfaktor limitiert durch Nadel
- Verschaltkappen notwendig
- Für konzentrierte und verteilte Wicklungen geeignet

Hairpin



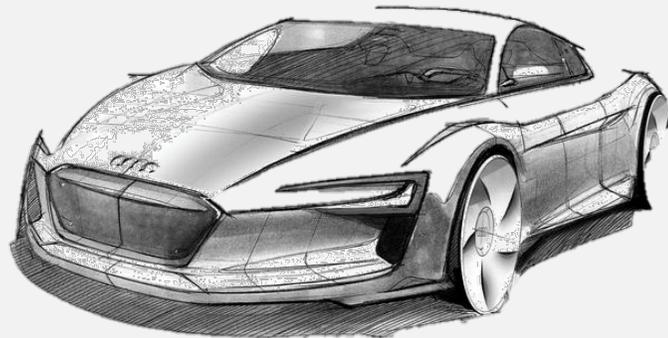
- Hybrides Verfahren
- Vorgeformte Spulen werden in die Nut des Stators eingelegt
- Hoher Leiterquerschnitt für hohe Ströme
- Verschaltung durch aufwändige Form- und Schweißwerkzeuge oder Kunststoff-Leiterteile
- Geringe Flexibilität



Anforderungen Automobilbranche

Kurze Taktzeiten

Hoher Automatisierungsgrad



Hohe Prozesssicherheit

Hohe Qualität; kein Ausschuss

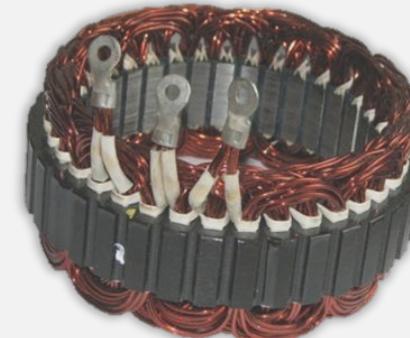
Geringer Bauraum & Gewicht



Charakteristika Wickeltechnik

Teilweise erfüllbar

Manueller Nacharbeitsbedarf



Halbwerkzeug Draht

Hohe Drahtbelastung

Breite Wickelköpfe

Quelle: Hagedorn, J. et al. (2016)_Handbuch der Wickeltechnik; Kampker, A. (2014)_Elektromobilproduktion;
Fleischer, J. et al. (2016)_Quo Vadis Wickeltechnik
Bildquelle: http://static3.heilbronnerstimme.de/storage/pic/eigenebilder/verschiedenes/1176885_3_1.jpg?version=1251461923

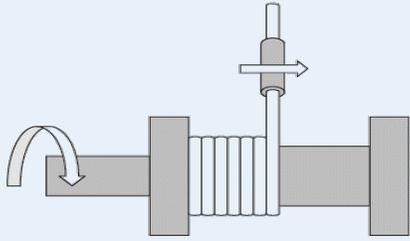
Grundlagen und Produkteigenschaften von Hairpinstatoren

Vergleich etablierter Wickelverfahren / Hairpin-Technologie



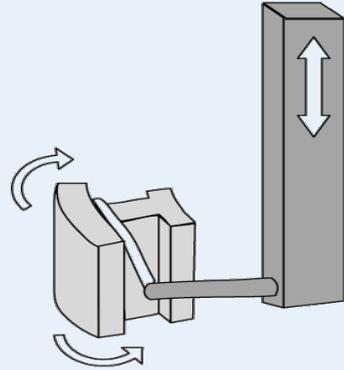
Direkte Wickelverfahren

Indirekte Wickelverfahren



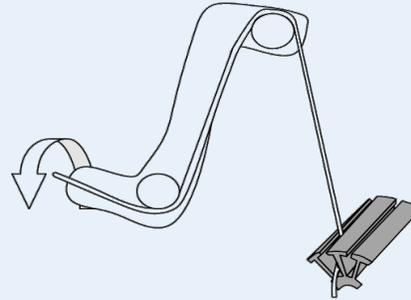
Linearwickeln

- Rotation des Formkörpers
- Lineare Drahtverteilung
- Orthozyklische Drahtverlegung möglich



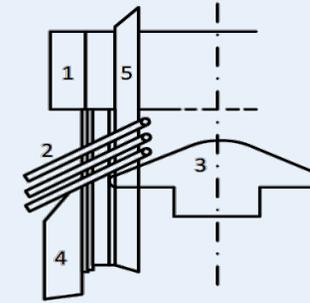
Nadelwickeln

- Direktes Einlegen des Drahtes mittels Nadel
- Platz für Nadeldurchfahrt



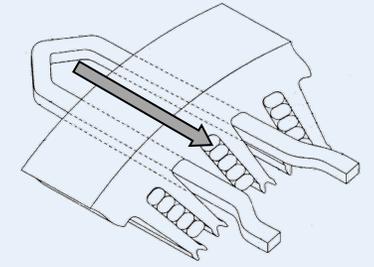
Flyerwickeln

- Rotierender Flyer um feststehenden Formkörper
- Abwurf des Drahtes



Flyerwickeln & Einziehen

- Externes Spulenwickeln
- Einziehen mit speziellem Werkzeug
- Nacharbeit und externe Kontaktierung



Hairpin

- Statorexternes Biegen der Pins
- Automatisiertes Einstecken der Drähte
- Biegen und Schweißen zur Kontaktierung

- el. Nutfüllfaktor $\approx 45 - 50\%$ (abhängig von Isolationsdicke)
- **Geringe** Prozesssicherheit
- Etablierte Technologien aufgrund umfangreicher Erfahrungen in bereits existierenden Produktionsverfahren

- el. Nutfüllfaktor $\approx 68 - 73\%$
- **Hohe** Prozesssicherheit
- Geringe Erfahrungen in der Produktion



Wirtschaftlichkeit

- Automatisierung ↗
 - Skalierbarkeit ↗
 - Kosten ↘
- **Serientechnologie**



www.blog.caranddriver.com

Prozessfähigkeit

- Keine stochastische Wicklung
 - Deterministische Montageprozesse
 - Deterministische Schweißprozesse
- **Geeignet für Automobile**



www.gm-volt.com

Wickeldesign

- Leiterquerschnitt ↗
 - Stromstärke ↗
 - Skin-Effect ↗
 - Flexibilität ↘
- **Drehmomentstarke Motoren**



www.atopwinding.com

Technologische Reife

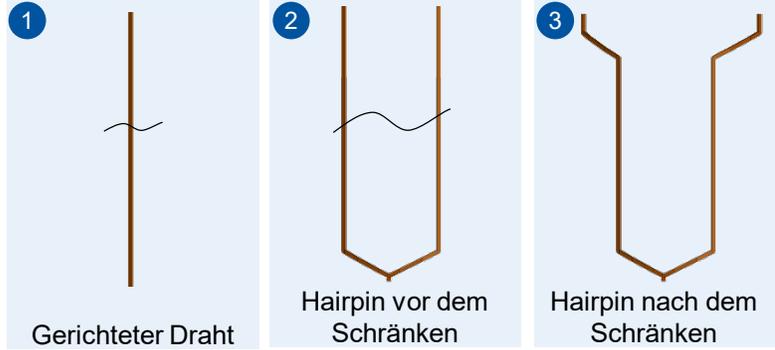
- Industrialisierung aktuell im Gange
 - Hohes wirtschaftliches und technologisches Potenzial ↗
 - Produktionstechnik als Enabler für die Produktentwicklung
- **Hohes Potenzial für die Beteiligung von Technologielieferanten und Anwendern**

Grundlagen und Produkteigenschaften von Hairpinstatorn

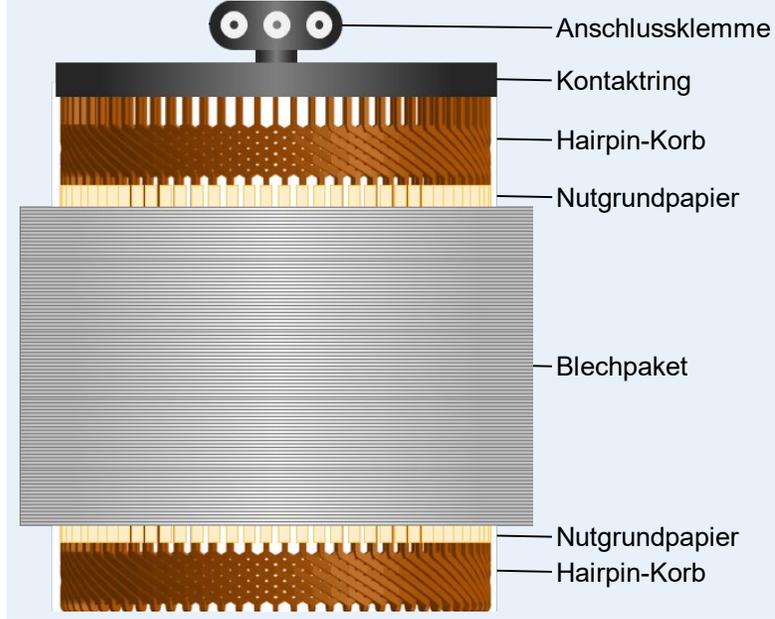
Aufbau eines U-Hairpin-Stators und generische Prozesskette



Geometrie eines Hairpin:



Aufbau eines Hairpin-Stators:

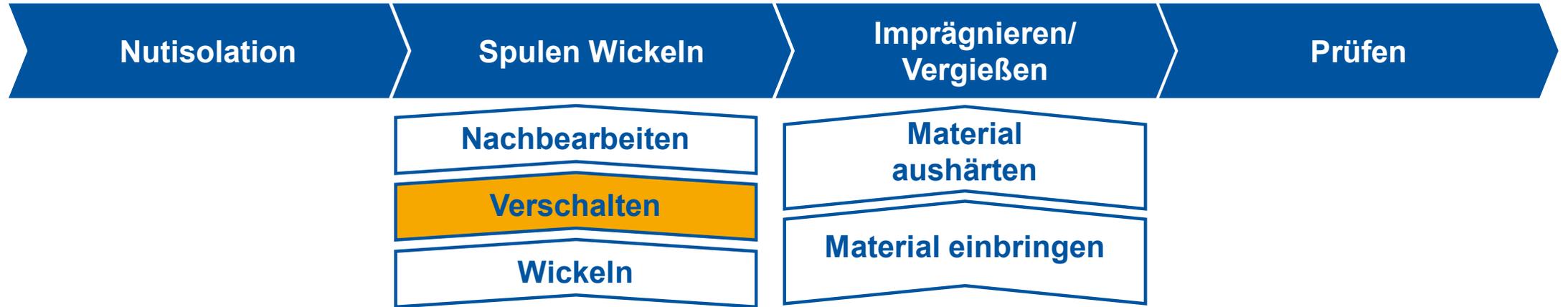


Generische Prozesskette der Hairpin-Technologie:



Prozesskette und Prozessalternativenmorphologie

Stator



Statorproduktion						
Nutisolation	Folie	Dünnwand-spritzguss	Kunststoffformteile	Bandagieren von Formspulen	Pulverbeschichtung	Isolierpaste
Wickeltechnologie	Flyerwickeln	Nadelwickeln	Linearwickeln	Steckspulen	Roboterwickeln	Manuell bewickeln
Wicklungsapplikation	Direkt	Vorlegen und Einziehen		Formspulen einsetzen	Formstäbe einsetzen	
Wicklungsbearbeitung	Zwischen- und Endformen		Deckenschieber einbringen	Bandagieren	Draht schneiden	
Draht bündeln	Splice Technik		Power Wheel Technik		Warmverpressen von Blechhülsen	
Kontaktieren	Löten	Widerstands-schweißen	Lichtbogenschweißen	Steckverbindung	Schneid-Klemmverbindung	Laserschweißen
Wicklung erwärmen	Ofen		Widerstandserwärmung		Induktiv erwärmen	
Imprägnieren	Tränken	Träufeln	Vakuuminprägung	Vakuumdruckimprägung	Backlack	Spritzguss
Reinigen	Laserreinigen		Abblasen	Entgraten	Nachlackieren	

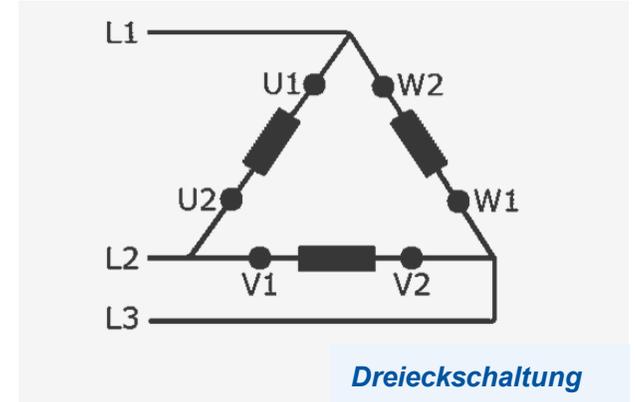
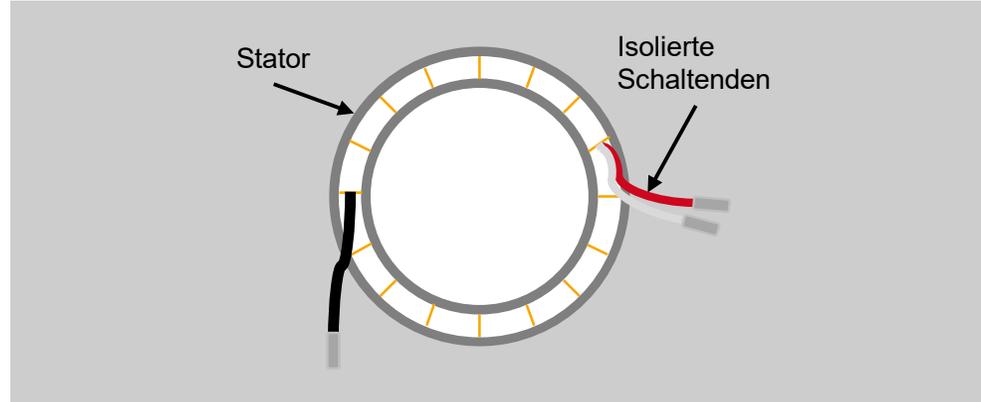
gebräuchlich
 nicht gebräuchlich



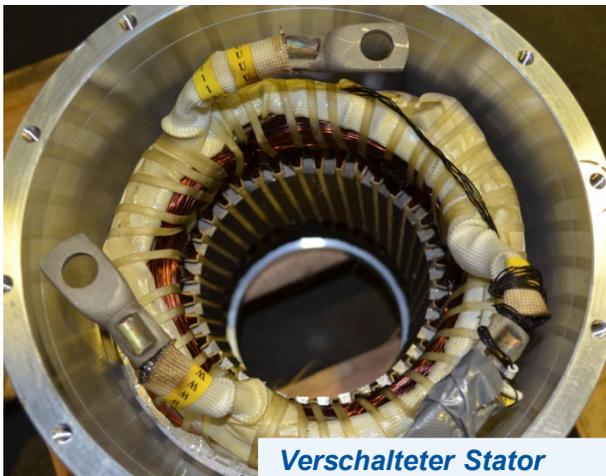
Verschalten



Schaltring für einen Hairpin-Stator



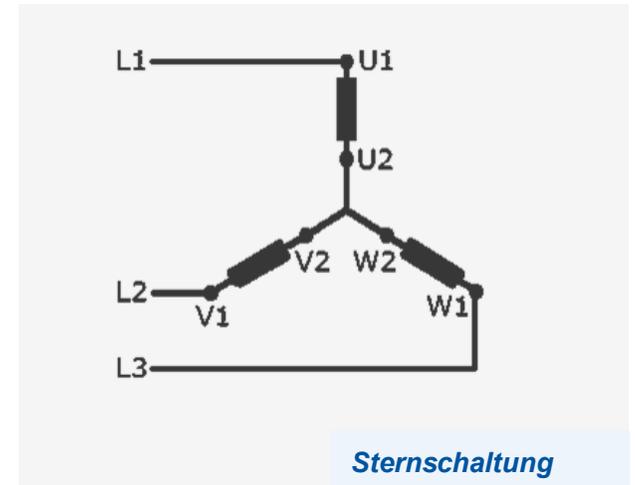
Dreieckschaltung



Verschalteter Stator

Prozessbeschreibung:

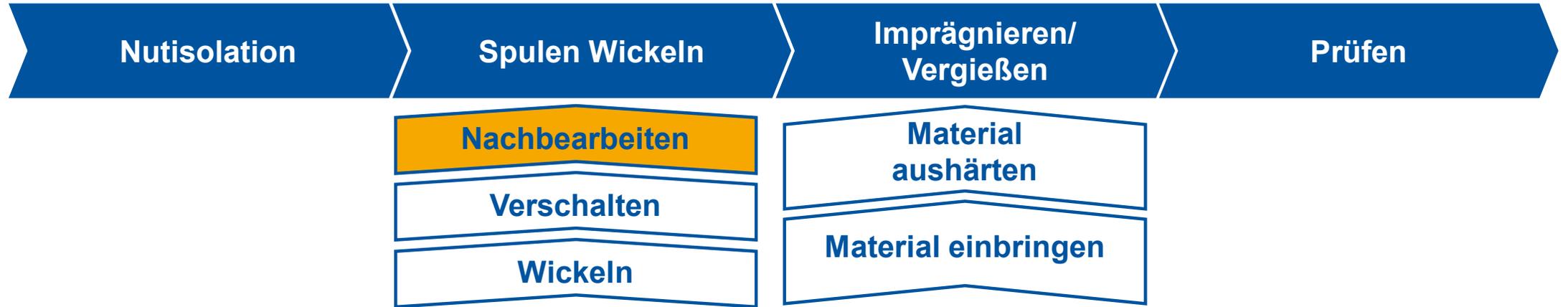
- Einzel gewickelte Spulen werden zu Phasen und zum gesamten Stator verschaltet (Dreieck oder Stern) – Verlegen und Verbinden der einzelnen Phasen notwendig
- Je nach Wickelverfahren und Statortopologie manuell oder automatisiert ausführbar
- Fehleranfälligkeit durch identisch aussehende Wicklungen
- Kontaktierung mittels Krimpen, Löten oder Schweißen



Sternschaltung

Prozesskette und Prozessalternativenmorphologie

Stator



Statorproduktion						
Nutisolation	Folie	Dünnwand-spritzguss	Kunststoffformteile	Bandagieren von Formspulen	Pulverbeschichtung	Isolierpaste
Wickeltechnologie	Flyerwickeln	Nadelwickeln	Linearwickeln	Steckspulen	Roboterwickeln	Manuell bewickeln
Wicklungsapplikation	Direkt	Vorlegen und Einziehen		Formspulen einsetzen	Formstäbe einsetzen	
Wicklungsbearbeitung	Zwischen- und Endformen		Deckenschieber einbringen	Bandagieren	Draht schneiden	
Draht bündeln	Splice Technik		Power Wheel Technik		Warmverpressen von Blechhülsen	
Kontaktieren	Löten	Widerstands-schweißen	Lichtbogenschweißen	Steckverbindung	Schneid-Klemmverbindung	Laserschweißen
Wicklung erwärmen	Ofen		Widerstandserwärmung		Induktiv erwärmen	
Imprägnieren	Tränken	Träufeln	Vakuuminprägung	Vakuumdruckimprägung	Backlack	Spritzguss
Reinigen	Laserreinigen		Abblasen	Entgraten	Nachlackieren	

gebräuchlich
 nicht gebräuchlich

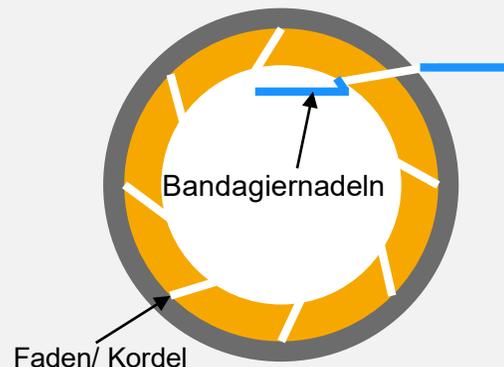


Bandagierung

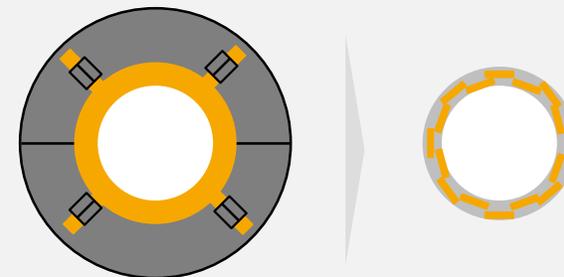


Formmaschine

Bandagieren

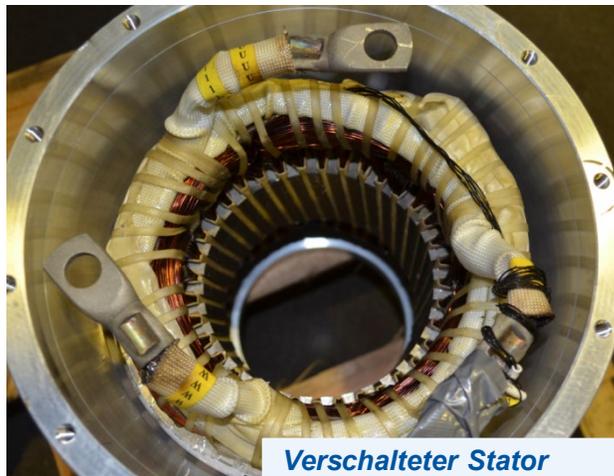
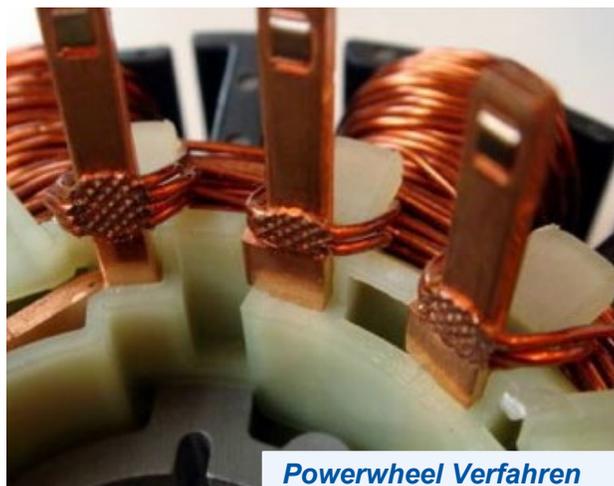


Zwischen-/ Endformen

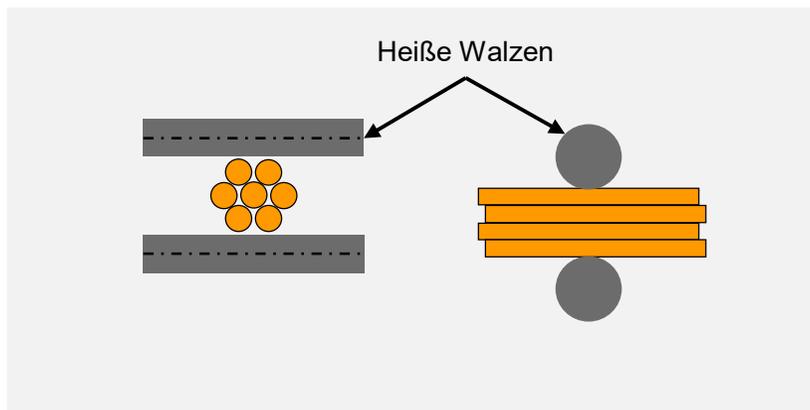


- Insb. die Wickelköpfe von eingezogenen Wicklungen sind nicht formstabil
- Mit einer Kordel werden diese komprimiert und zusammengehalten
- Nur mit sehr hohem Aufwand automatisierbar
- Zeitaufwändiges Verfahren

- Die einzelnen Stränge der Wicklungen liegen je nach Wickelverfahren wild in der Nut (z.B. bei der Einzugswicklung)
- Zur Erhöhung des Füllfaktors, der Ermöglichung weiterer Einzüge und zur Sicherstellung, dass kein Draht aus der Nut übersteht, werden die Wicklungen in den Nutgrund gepresst
- Aufwändiges Werkzeug notwendig

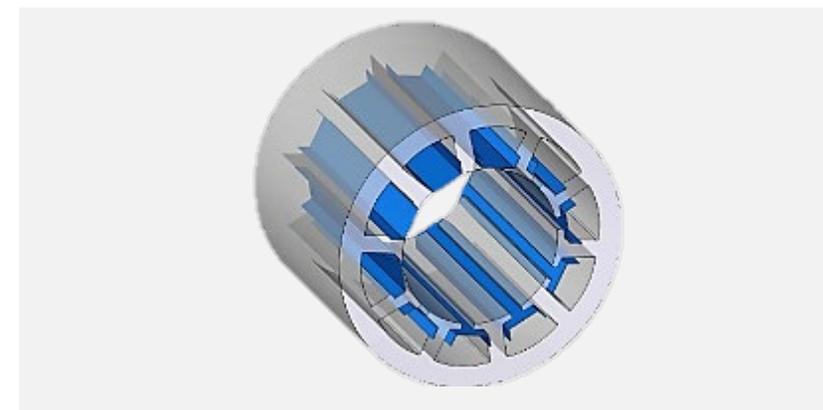


Terminieren und Bündeln



- Aufgrund von Stromverdrängungs-effekten und Produzierbarkeits-aspekten werden oftmals Drahtlitzen (Bündelstränge) verbaut
- Diese Litzen werden nach dem Wickelvorgang gebündelt oder für die Verschaltung erneut terminiert (gezielt befestigt)
- Powerwheel-Verfahren (Siehe Abbildung) oder Verpressen von Hülssen

Deckschieber einbringen



- Ein nicht geschlossenes Blechpaket verfügt über Öffnungen der Nut
- Diese können nach dem Bewicklungsprozess durch sog. Deckschieber aus Isolationsmaterial verschlossen werden
- Deckschieber sollen das Austreten der Wicklung und das Eindringen von Fremdstoffen in das Blechpaket verhindern