



Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

SCALE-UP
E-DRIVE

Demontage-Seminar Elektromotoren in Hartha

Hartha, 25. September 2025

Agenda

Demontage-Seminar Elektromotoren in Hartha

01

Begrüßung und Sicherheitsunterweisung
09:00 Uhr

04

Kaffeepause
11:00 Uhr

02

Integrierte Antriebssysteme im Überblick
09:30 Uhr

05

Produktionstechnologien im Vergleich
11:30 Uhr

03

Praxiseinblick „Demontage eines E-Antriebs“
10:15 Uhr

06

Praxiseinblick „Vergleich aktueller Motoren“
12:15 Uhr

07

Abschlussdiskussion, Feedback und Rundgang
13:30 Uhr

Agenda

Demontage-Seminar Elektromotoren in Hartha

01

Begrüßung und Sicherheitsunterweisung
09:00 Uhr

04

Kaffeepause
11:00 Uhr

02

Integrierte Antriebssysteme im Überblick
09:30 Uhr

05

Produktionstechnologien im Vergleich
11:30 Uhr

03

Praxiseinblick „Demontage eines E-Antriebs“
10:15 Uhr

06

Praxiseinblick „Vergleich aktueller Motoren“
12:15 Uhr

07

Abschlussdiskussion, Feedback und Rundgang
13:30 Uhr

Vernetzungsprojekt ScaleUp eDrive

SCALE-UP
E-DRIVE

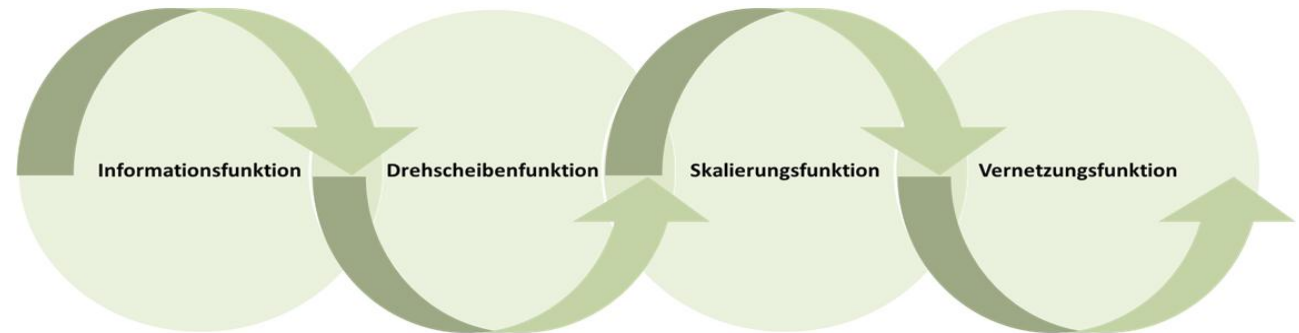
Transformations-Hub für elektrischer Antriebe

Herausforderung

- **Bis 2030 werden** in der Automobilindustrie aufgrund der Umstellung weg von verbrennungsmotorischen hin zu elektrischen Antrieben bis zu **200.000 Arbeitsplätze entfallen**.
- Vor allem **kleine und mittelständische Unternehmen (KMU)** mit hohem technologischen Know-How in Spezialanwendungen von Verbrennungskraftmaschinen **drohen bei der laufenden Transformation den Anschluss zu verpassen**.
- Es gilt insbesondere **KMU** durch die Aktivitäten des Hubs **zielgerichtet** bei der Transformation zu **unterstützen**.

Lösungsansätze & Ziele

- **Übergeordnetes Ziel** des Transformationshubs ScaleUp eDrive ist es, aktuelle Trends und Brancheninformationen aufzubereiten und sie den Akteuren der Value Chain elektrischer Antriebe zugänglich zu machen.
- **Aufgabe des PEM** ist es **wesentliche Erkenntnisse** aus Industrie und Forschung **für ein breites Publikum aufzubereiten** und interaktiv und praxisorientiert zu vermitteln
- Zusätzlich werden in **innovativen Formaten** neue und bestehende **Akteure der Wertschöpfungskette vernetzt** und zentrale Fragestellungen gemeinsam adressiert



Projektpartner

bayern innovativ

e-mobil
Landesagentur für neue Mobilitätsformen
und Automotive Baden-Württemberg



TUM

Lehrstuhl für
Fahrzeugtechnik

PEM

RWTH AACHEN
UNIVERSITY

SCALE-UP
E-DRIVE

Zuwendungsgeber

BMWK

Laufzeit

01.01.2023 –
31.12.2025

Projekträger

VDI | VDE | IT

Förderkennzeichen

16THB0006E

Vorstellung Production Engineering of E-Mobility Components (PEM)

Produktionstechnik ist ein Forschungsschwerpunkt der RWTH Aachen



Production Engineering of E-Mobility Components

2014 gegründet

107 Vollzeitstellen: 75 Forschende, 32 Beschäftigte in Technik & Verwaltung*

130+ studentische Hilfskräfte*

Neuer Hauptstandort im „Avantis European Science and Business Park“

700 m² Büroflächen und 2.000 m² Produktionsfläche



an der

RWTH Aachen

1870 gegründet

Höchster Drittmittelanteil in Deutschland

Eine von 11 Exzellenzuniversitäten

10.250 Beschäftigte**, 47.269 Studierende***

70+ Institute im Maschinenbau

*Stand: September 2022; **offizielle Statistik 2021; ***Stand: Wintersemester 2021/2022

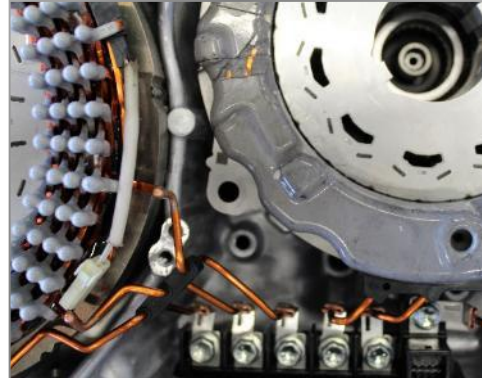
Vorstellung Production Engineering of E-Mobility Components (PEM)

Unsere Kernbereiche

Schlüsselkomponenten



Batterie



Elektroantrieb



Brennstoffzelle

Integration



Nutzfahrzeuge

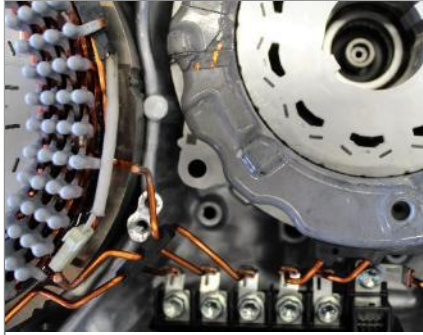
Wir entwickeln wegweisende **Produkte** zur nachhaltigen Herstellung elektrifizierter Antriebsstränge



Wir konzentrieren uns auf **Produktions**prozesse und Innovationen für eine kosteneffiziente Realisierung dieser Produkte

Vorstellung Production Engineering of E-Mobility Components (PEM)

Unser Kernbereich „Elektroantrieb“



Elektroantrieb

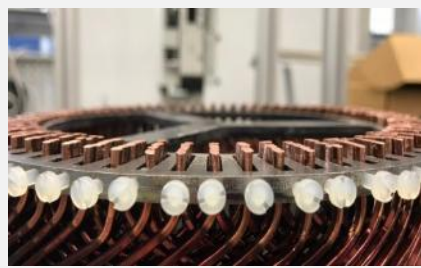


SCALE-UP
E-DRIVE

Unsere langfristige Mission

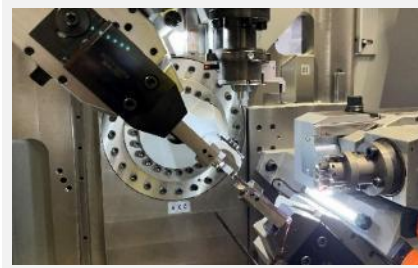
Wir leisten einen Beitrag zur **wirtschaftlichen, variantenflexiblen, zukunftsgewandten und nachhaltigen Produktion** des **elektrischen Antriebs** und untersuchen **Fragestellungen entlang der gesamten Wertschöpfungskette** – vom **Halbzeug** bis hin zum **fertigen Antrieb** und vom **Einzelprozess** bis hin zur ganzheitlichen Betrachtung **prozessübergreifender Wirkzusammenhänge**.

Unsere Schwerpunktaktivitäten in der Gruppe „Electric Drive Production“



Prototyping von Rotoren und Statoren

- Aufbau von Statoren und Rotoren als Funktionsmuster in kleinen Stückzahlen
- Prozessentwicklung und -umsetzung und Testing im Laborumfeld



Machbarkeitsstudien & Validierung

- Parameterentwicklung und Versuchsdurchführung
- Vergleich von Einzelkomponenten und -prozessen mit aktuellen am Markt verfügbaren Produkten



Produktionsplanung und -optimierung

- Produktions(konzept)planung & Anforderungsmanagement
- Prozess- und Layoutplanung
- Kostenanalyse und -planung
- Wertschöpfungsanalysen



Anlaufsupport & Ursachenanalyse

- Lieferantenmanagement
- Trouble Shooting, Fehlerursachen- und Interdependenzanalysen
- Koordination von Anlagenumbauten

Agenda

Demontage-Seminar Elektromotoren in Hartha

01

Begrüßung und Sicherheitsunterweisung
09:00 Uhr

04

Kaffeepause
11:00 Uhr

02

Integrierte Antriebssysteme im Überblick
09:30 Uhr

05

Produktionstechnologien im Vergleich
11:30 Uhr

03

Praxiseinblick „Demontage eines E-Antriebs“
10:15 Uhr

06

Praxiseinblick „Vergleich aktueller Motoren“
12:15 Uhr

07

Abschlussdiskussion, Feedback und Rundgang
13:30 Uhr



Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

SCALE-UP
E-DRIVE

Demontage-Seminar Elektromotoren in Hartha

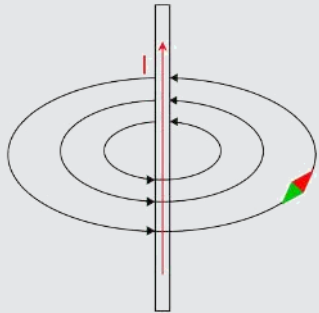
Integrierte Antriebssysteme im Überblick

Hartha, 25. September 2025

Elektrotechnische Grundlagen

Grundlagen des Elektromagnetismus

Stromdurchflossener Leiter



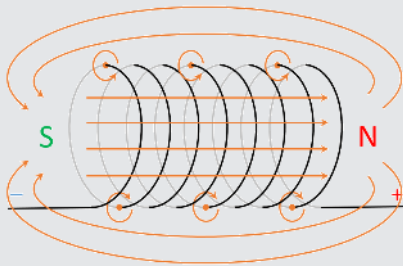
$$B = \mu_0 \frac{1}{2\pi r} * I$$



Stromdurchflossener Leiter

- Fließt Strom durch einen Leiter, bildet sich ein konzentrisches Magnetfeld um den Leiter
- Da Magnetfeldlinien in konzentrischen Kreisen um den Leiter verlaufen, weisen sie keinen Pol auf
- Magnetische Flussdichte B ist direkt proportional mit Stromstärke im Leiter I und wird vom Material über die magnetische Feldkonstante μ beeinflusst

Magnetfeld einer Leiterspule



$$B = \mu_0 \frac{I * N}{l}$$



Magnetisches Feld einer Leiterspule

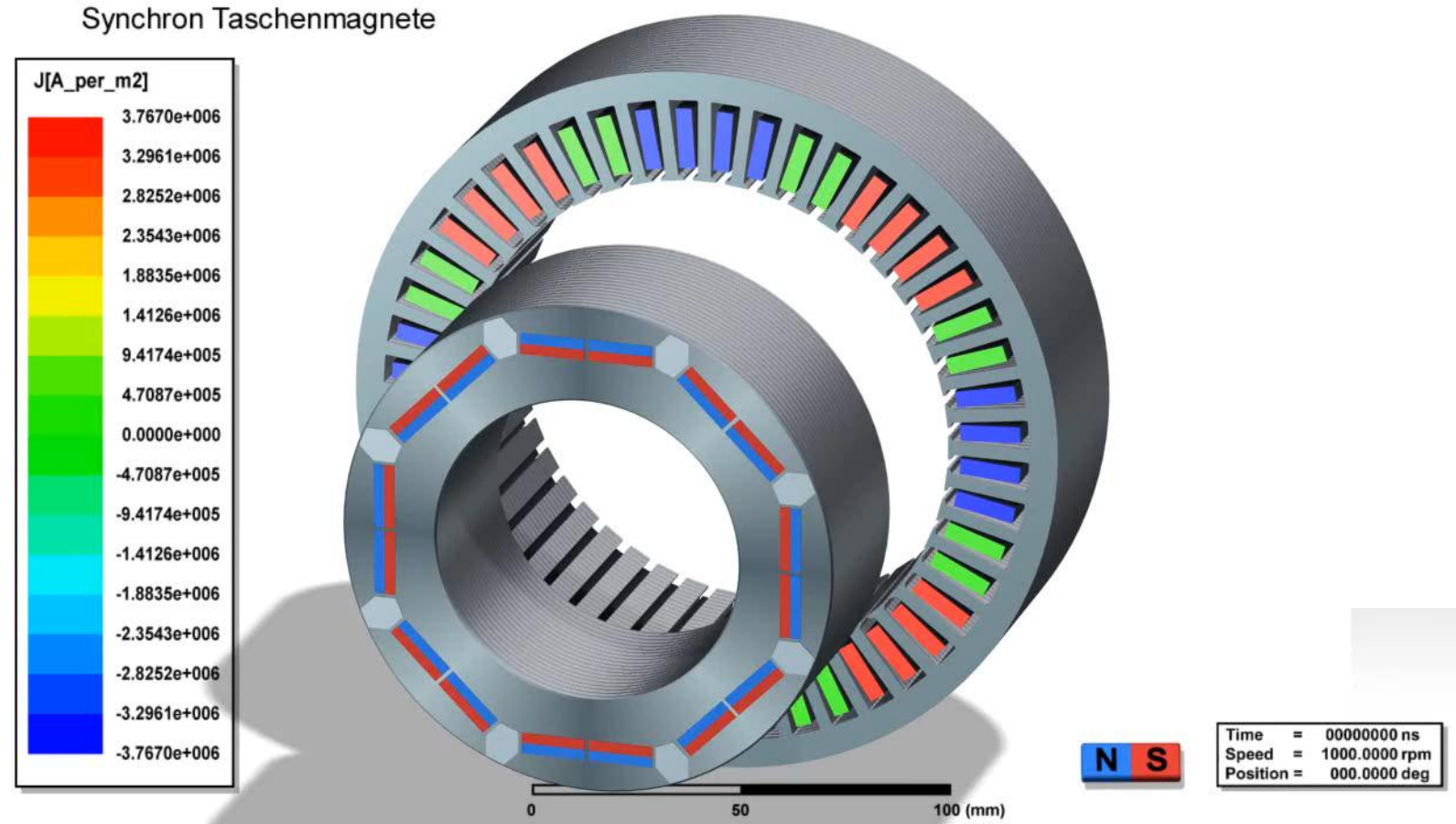
- Durch kreisförmige Anordnung des Leiters können Feldlinien gelenkt werden, sodass sich Pole ausbilden
- Flussdichte B steigt mit der Windungsdichte n an, die von der Windungszahl N über die Länge der Spule l bestimmt wird

Elektrotechnische Grundlagen

Funktionsweise eines permanentenerregten Synchronmotors

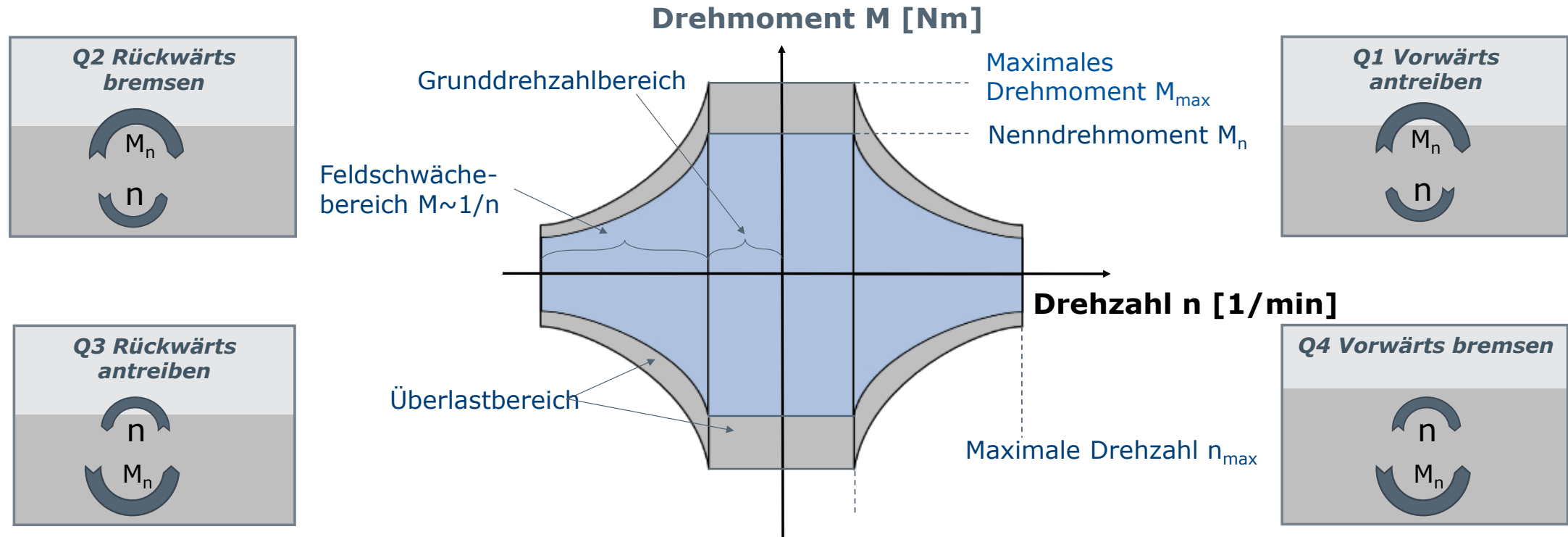


Videoquelle: Kessler



Bewegungsrichtung: Vorwärts und Rückwärts

Aus den vier Quadranten ergeben sich verschiedene Betriebsmodi elektrischer Maschinen



Verschiedene Betriebsarten führen zur Steuerung von Fahrtrichtung, Geschwindigkeitsänderung und Bremsung durch Umpolung. Für die Rückwärtsfahrt ist somit kein schaltbares Getriebe erforderlich.

Quelle: Eckstein L.: Longitudinal Dynamics of Vehicles, 2014

Relevante Motortopologien im Kontext der Elektromobilität

Generische Produktarchitektur und Funktion eines Elektromotors

Getriebe

- Wandlung von Drehzahl und Drehmoment
- Leistungsübertragung an Abtrieb

Leistungselektronik

- Bereitstellung eines dreiphasigen Drehstromfeldes

Stator

- Erzeugung eines elektromagnetischen Drehfeldes

Blechpakete

- Gezielte Leitung des magnetischen Flusses
- Minderung von Verlusten

Rotor

- Aufbau eines Magnetfeldes
- Wandelt elektrische Energie in mechanische Energie

Gehäuse

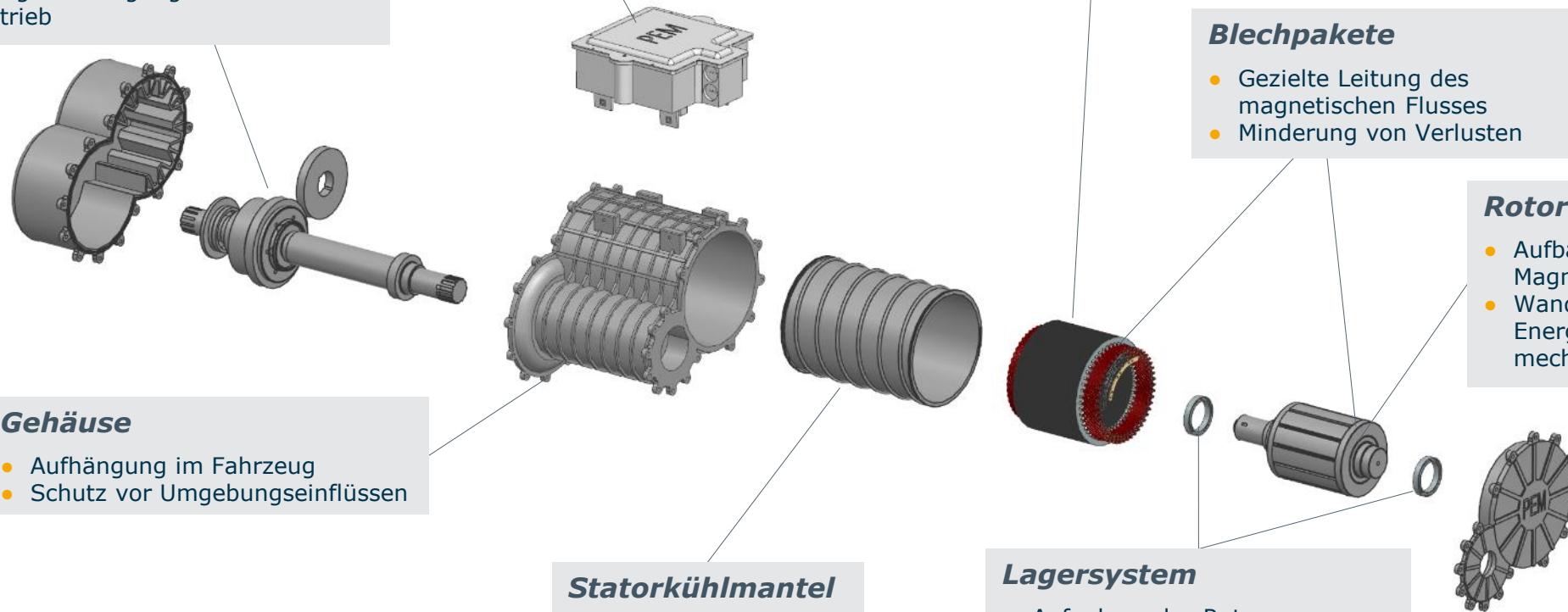
- Aufhängung im Fahrzeug
- Schutz vor Umgebungseinflüssen

Statorkühlmantel

- Kühlung des Stators

Lagersystem

- Aufnahme des Rotors
- Übertragung radialer Kräfte



Produktdesign elektrischer Maschinen

Der Rotor ist die differenzierende Baugruppe des Elektromotors

Permanenterregter Synchronmotor



- Vorteile in Effizienz und Leistungsdichte gegenüber ASM und FSM bei höheren Kosten
- Geringer Bauraum befähigt zur Anwendung in Hybridfahrzeugen

Asynchronmotor



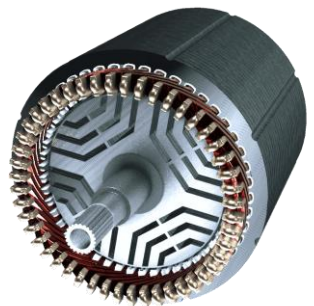
- Vollst. abschaltbar (im Gegensatz zu PSM) macht „Segeln“ energieeffizient möglich, da Schleppverluste entfallen
- Geringere Einzelkosten als PSM/FSM

Fremderregter Synchronmotor



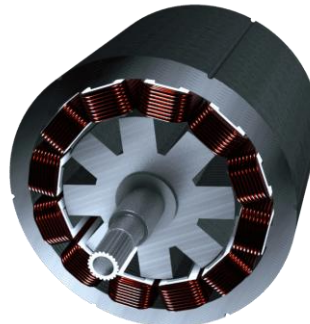
- Aufgrund der geringen Kosten und der einfachen Konstruktion besonders geeignet für die Anwendung in kostenempfindlichen Fahrzeugklassen

Synchronreluktanzmotor



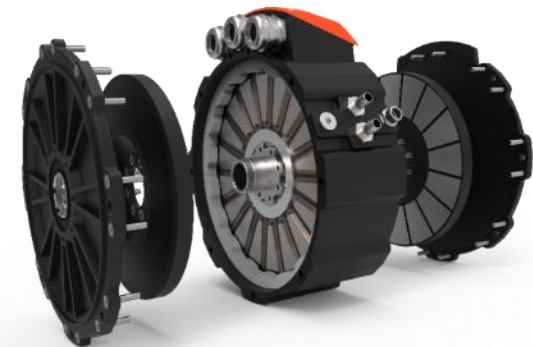
- Rotor ohne Kupfer oder Permanentmagnete ist kostengünstig herstellbar
- Kein Rastmoment
- Robust gegenüber hohen Temperaturen
- Wirkprinzip wird oft mit klassischer PSM kombiniert

Geschalteter Reluktanzmotor



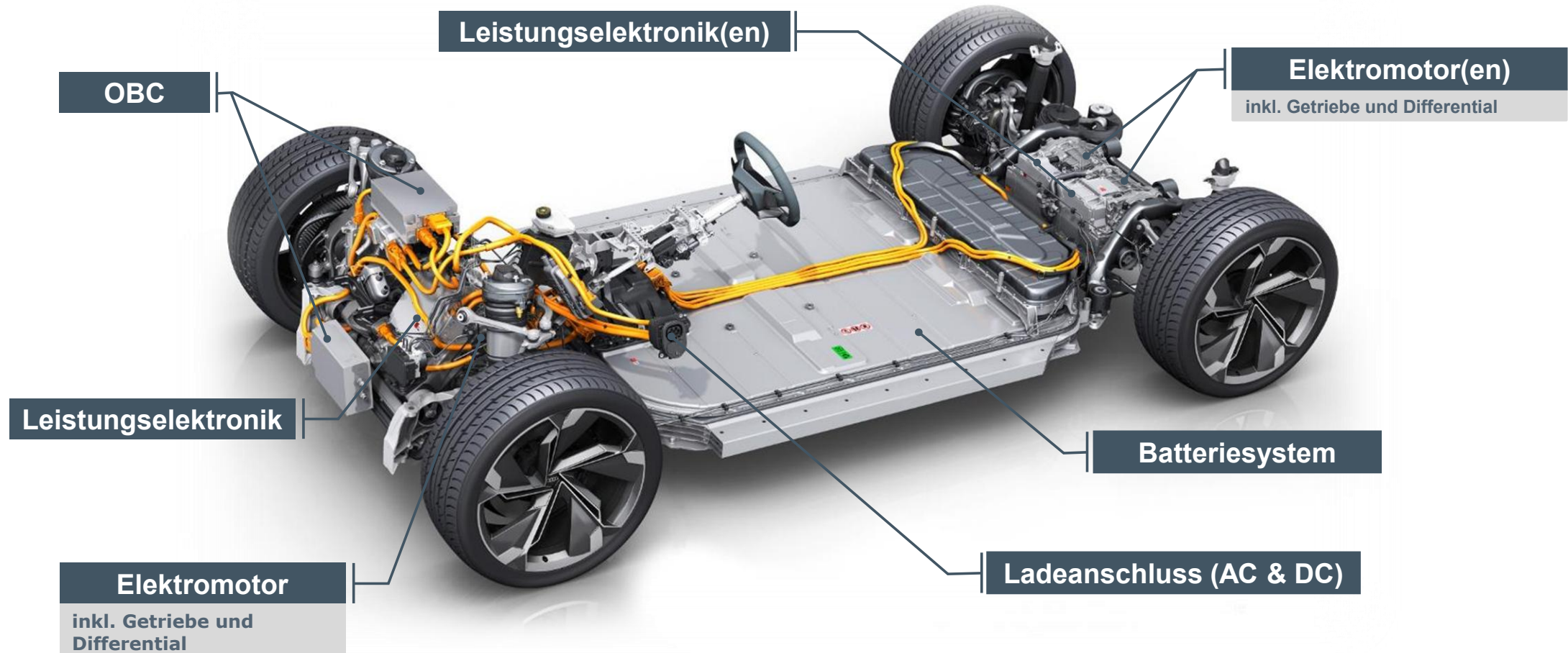
- Rotordesign ermöglicht hohe Drehzahlen
- Kostengünstige und unkomplizierte Fertigung durch konzentrierte Wicklung und simples Design

Axialflussmotor



Grundaufbau des elektrischen Antriebsstrangs

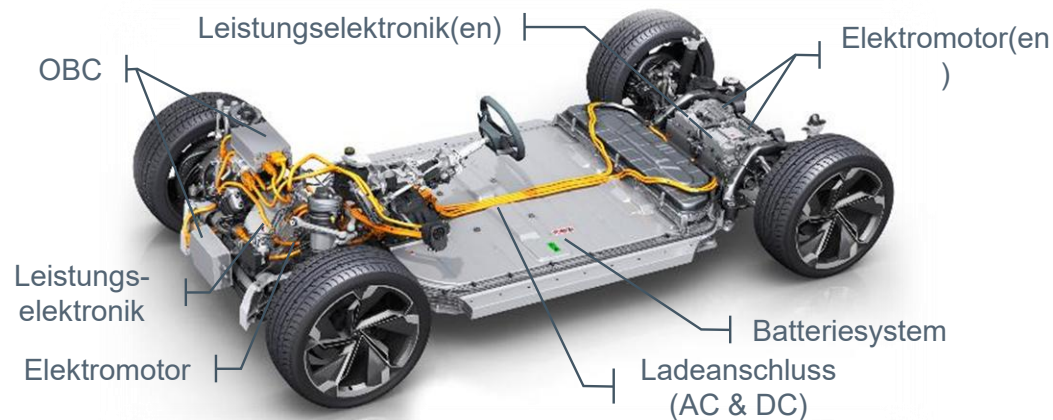
Beispiele für elektrifizierte Antriebsstränge



Elektrische Antriebe im Pkw-Sektor

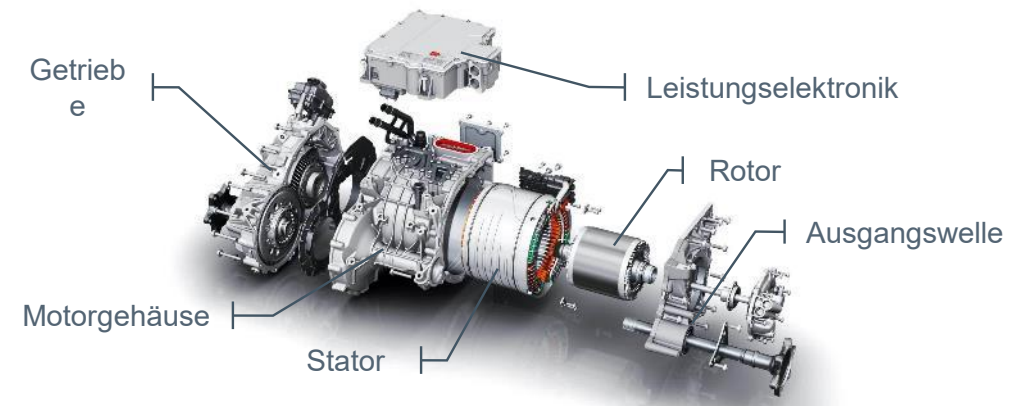
Integrierte Antriebseinheiten als Stand der Technik

Modulare Elektrofahrzeug-Plattformen



- Strategie zur Senkung von Kosten und Entwicklungszeiten durch Einsatz eines Baukastens für mehrere Fahrzeuge
- Skalierbarkeit und Flexibilität sind die Hauptziele, wobei Motor, Batterie und Radabstand die wichtigsten Variabilitätsfaktoren darstellen
- Beispiele:
 - Volkswagen: MEB
 - GM: Global EV-Plattform
 - Hyundai: E-GMP

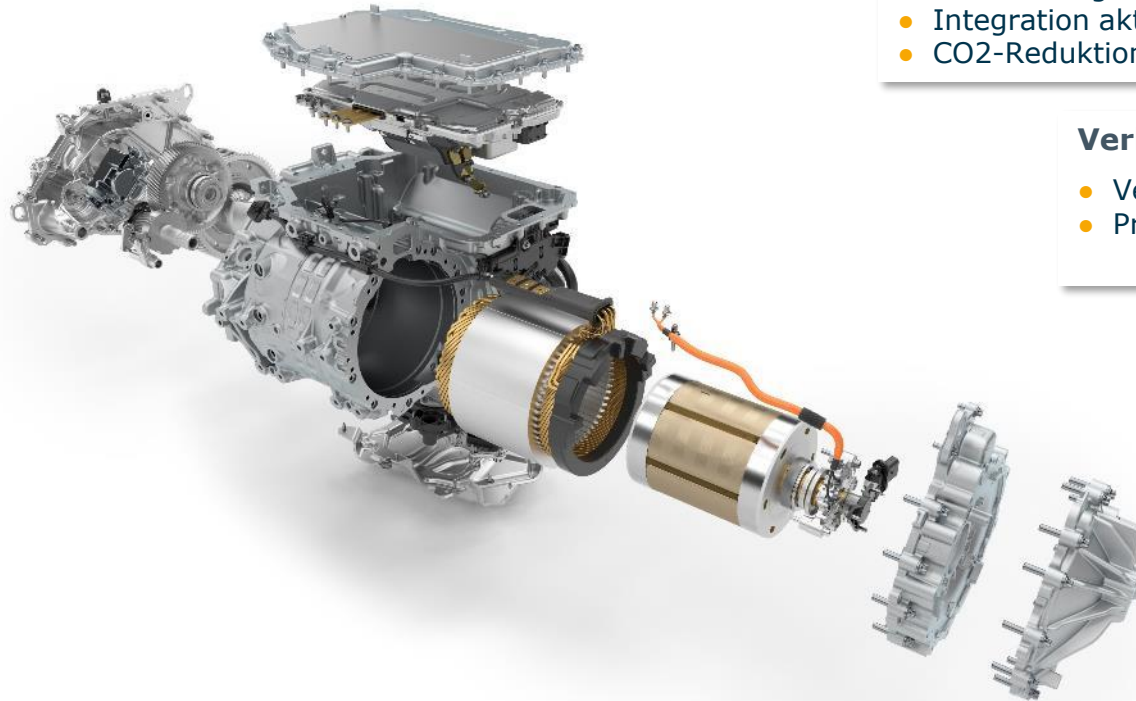
Integrierte Antriebsstrangsysteme



- Zentralisierung der verschiedenen Komponenten in einer geometrisch kompakten Einheit
- Trend zur Konzentration von Komponenten innerhalb eines Gehäuses und geschlossenem Antrieb an den Rädern oder Substitution der mechanischen Achse
- Das reduzierte Volumen des integrierten Antriebsstrangs unterstützt den Trend von herkömmlichen Fahrzeugarchitekturen und -eigenschaften zu neuen Fahrzeug- und Mobilitätskonzepten

Integrierte Antriebsstrangsysteme

Ziele der Integration der Komponenten im elektrischen Antriebsstrang



Höhere Effizienz

- Reduzierung mechanischer Komponenten erhöhen die Effizienz des Antriebsstrangs
- Integration aktiver Kühlkreisläufe erhöht die Effizienz des Gesamtsystems
- CO₂-Reduktion in der Produktion

Verbesserte Fahreigenschaften

- Verbesserte Fahrdynamik durch Drehmoment-Verteilung (torque vectoring)
- Programmierbare Fahrmodi

Reduzierung von Kosten und Gewicht

- Bauraum- und Gewichtsreduzierung
- Reduzierung des Gewichts des Kabelbaums
- Reduzierte Anzahl von Teilen und Schnittstellen


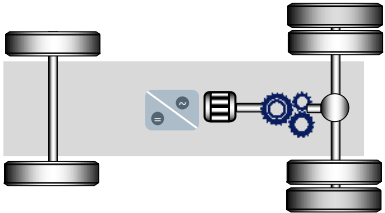


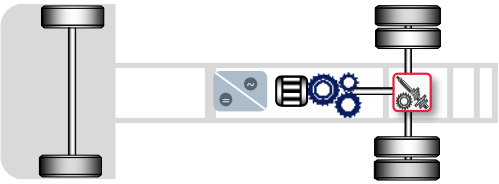


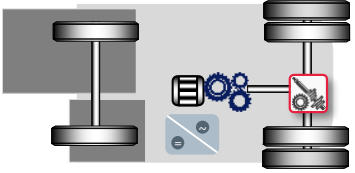

Höhere Skalierbarkeit und Modularität

- Mehrfachanwendung
- Reduzierung der Engineering-Durchlaufzeit
- Gestaltungsfreiheit durch Volumenreduzierung

Das reduzierte Volumen des integrierten Antriebsstrangs unterstützt den Wechsel von konventionellen Fahrzeugarchitekturen und -eigenschaften hin zu neuen Fahrzeug- und Mobilitätsanwendungen

Elektrifizierung weiterer Mobilitätsbereiche

Ähnliche Antriebsstrukturen mit übereinstimmenden Komponenten

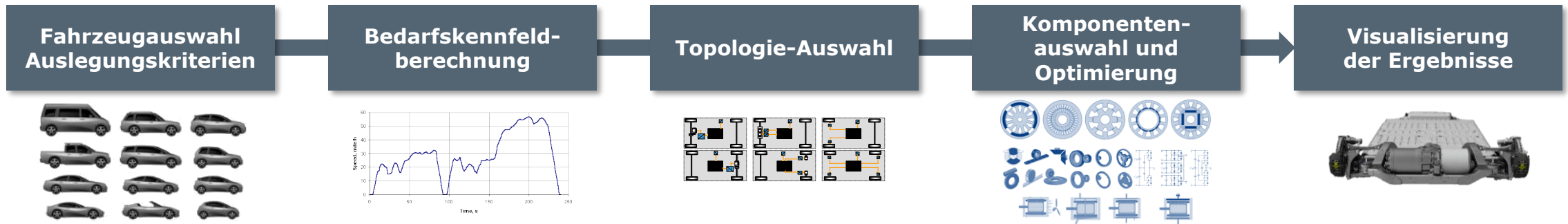
	Sektor	Klasse	Leistungsbereich (kW)	Beispiel
Landwirtschaft z.B.: eTraktor	 	Compact	<45	
		Utility	<100	
		Farm	<350	
		Custom	<850	
Transport z.B.: eTruck	 	>3,5t	<90	
		7,5t	<200	
		18t	<300	
		40t	<500	
Baumaschine z.B.: Bagger	 	6t	<50	
		10t	<70	
		10t – 45t	<200	
		>45t	<3000	

Bildquellen: etraktor, Isuzu, Volvo, alke, TM4, DMS

Gesamtfahrzeugintegration

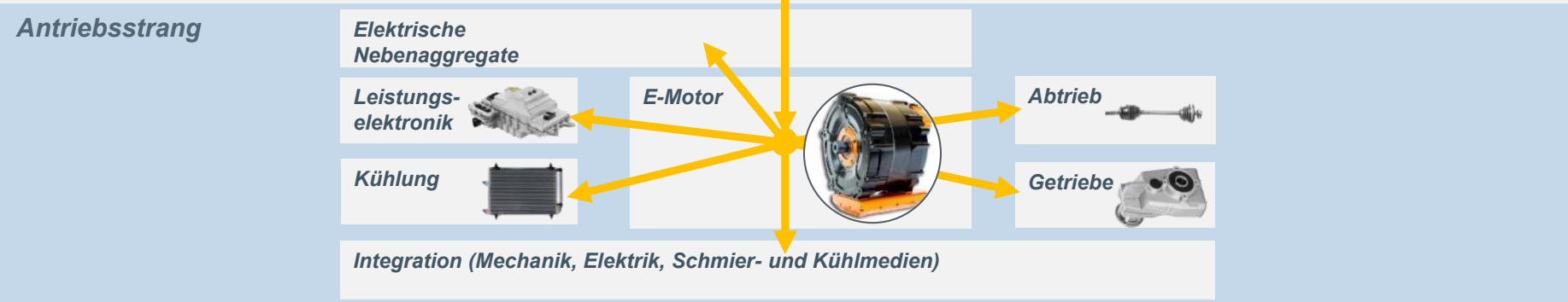
SCALE-UP
E-DRIVE

Fahrzeugintegration von Elektromotoren



Gesamtfahrzeug

Antriebsstrang



Das reduzierte Volumen des integrierten Antriebsstrangs unterstützt den Wechsel von konventionellen Fahrzeugarchitekturen und -eigenschaften hin zu neuen Fahrzeug- und Mobilitätsanwendungen.

Anforderungen an den elektrischen Antriebsstrang

SCALE-UP
E-DRIVE

Die spezifischen Anforderungen an LKW und PKW unterscheiden sich in vier Dimensionen



Dauerlastfähigkeit

- Bei hoher Fahrzeugmasse Geschwindigkeit am Hang größeren Einfluss auf Leistungsbedarf als Höchstgeschwindigkeit auf ebener Strecke.



Überlastdauer

- Beschleunigungsleistung muss mit steigender Fahrzeugmasse länger bereitgestellt werden, sodass leistungstärkere Kühlung benötigt wird



Lebensdauer

- Häufiges Ausnutzen der Betriebsgrenzen und erschwerte Betriebsbedingungen reduzieren Lebensdauer der Komponenten



Regelungstechnik & Energiemanagement

- heterogene Fahrmodi mit verschiedenen Energiequellen bedingen regelungs- und konstruktionstechnischen Aufwand



© Tesla



© Tesla

Gesamtfahrzeugintegration

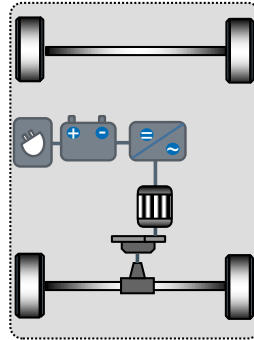
Integration der verschiedenen Antriebsstrangkonfigurationen

Zentralmotor

Einfache Bauweise

Unkomplizierte Integration

Eignet sich vor allem für Umrüstung von konventionellen Antriebssträngen

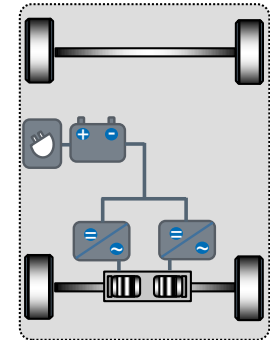


E-Achse: Radnahmotoren

Einzel- oder Doppelmotorvarianten erhältlich

Ressourcen- und kosteneffiziente Entwicklung und Produktion

Vereinfachte Integration durch Purpose Design

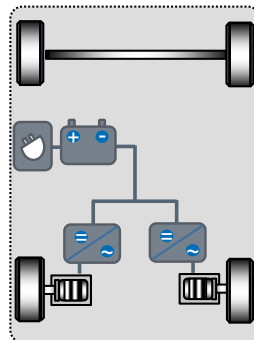


Radnabenmotoren

Dedizierte Motoren für Antriebsräder

Mehr Freiheiten beim Design des Autos

Motoren sind Teil der ungefederten Masse und werden hohen mech. Belastungen ausgesetzt

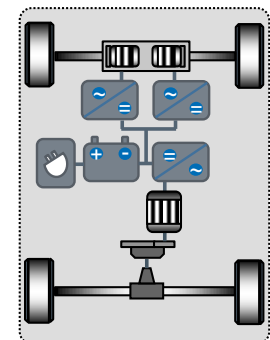


Splitachse

Variable Achslastverteilung mit intelligenter Betriebsstrategie kombiniert

Wahlfreiheit aus mehr als einem Motortyp

Komplizierte und kostenintensive Integration

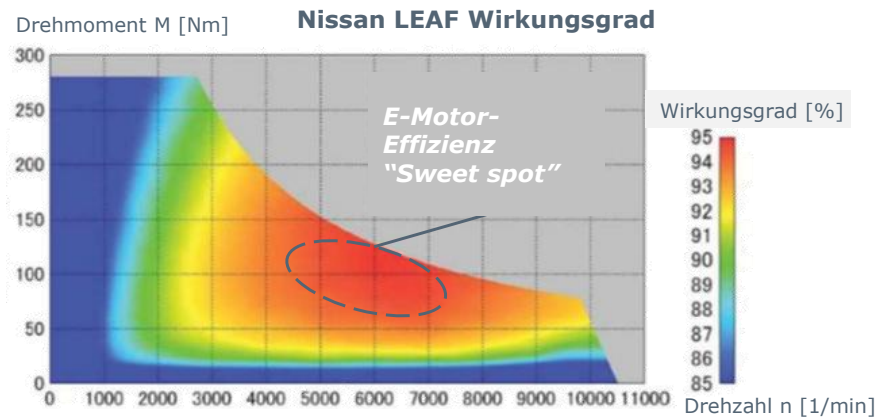


Die Wahl aus verschiedenen Topologien bietet zahlreiche Möglichkeiten, einen elektrischen Antriebsstrang auszulegen sowie zu produzieren.

Integration des Getriebes

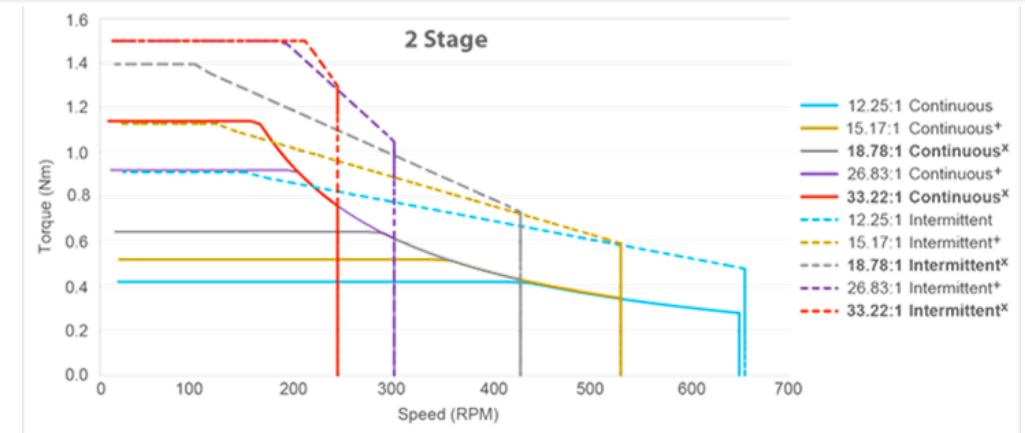
Ziele und Vorteile des Untersetzungsgetriebes

Aufgabe des Untersetzungsgetriebes



- Wirkungsgrad des E-Motors sinkt bei niedrigen sowie hohen Geschwindigkeiten (insb. bei kleinem M / kleinem n ist er ineffizient → Start-Stop-Verkehr bei Stadtfahrten)
- Jeder Motor hat einen "Sweet Spot" (höchster Wirkungsgrad), oft im mittleren Drehmoment- und Drehzahlbereich
- Überdimensionierter Motor zur Kompensation erforderlich

Vorteile des Untersetzungsgetriebes im E-Fahrzeug



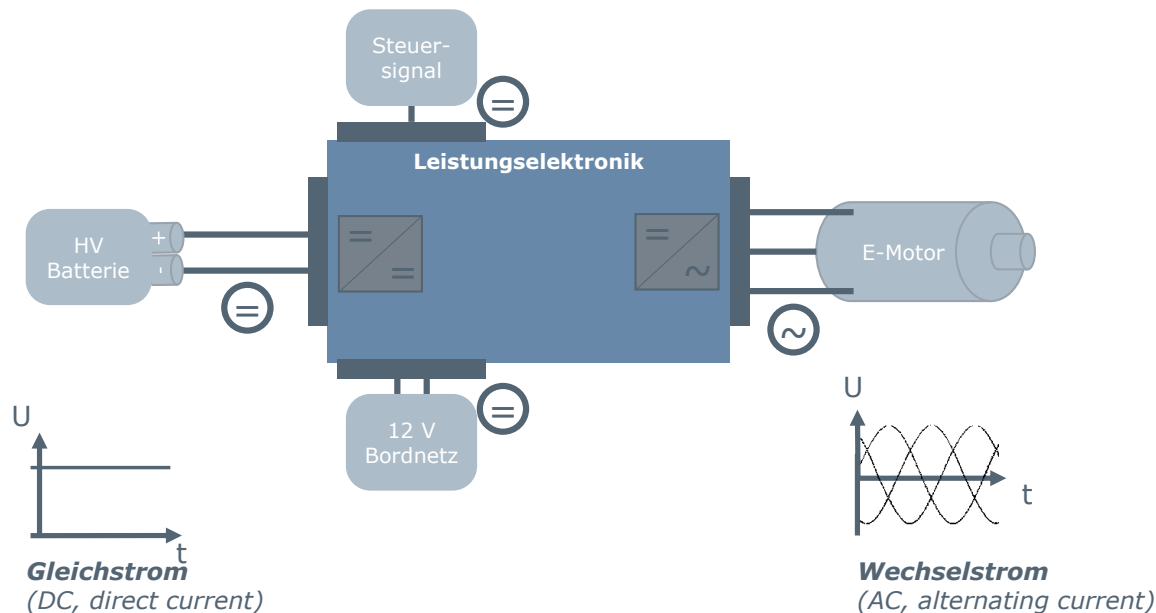
- Durch Untersetzungsgetriebe lassen sich folgende Vorteile realisieren:
 - Sanfterer Start
 - Bessere Steigfähigkeit (besonders gut für Frachtanwendungen)
 - Schnellere Beschleunigung
 - Höhere Geschwindigkeit
 - Bis zu 10% Effizienzsteigerung

Das reduzierte Volumen des integrierten Antriebsstrangs unterstützt den Wechsel von konventionellen Fahrzeugarchitekturen und -eigenschaften hin zu neuen Fahrzeug- und Mobilitätsanwendungen.

Integration der Leistungselektronik

Aufbau und Aufgaben der Leistungselektronik



Schematische Darstellung der Einbindung



Hauptaufgaben der Leistungselektronik

- Bereitstellung von Wechselstrom für den E-Motor sowie Bereitstellung eines elektronischen Zwischenkreises (zur Kopplung verschiedener elektrischer Netze)
- Wandlung und Glättung der innerhalb des elektrischen Antriebsstrangs auftretenden Spannungen bzw. Spannungsspitzen
- Kommunikation mit der Fahrzeugsteuerung (Empfang und Umsetzung der Steuersignale)

Wandler innerhalb der Leistungselektronik

- **DC/DC-Wandler (Gleichspannungswandler)**
 Elektrisches Bauteil, das die Gleichspannung der Batterie in eine Gleichspannung mit verändertem Spannungsniveau (höher oder niedriger) für das interne 12V-Bordnetz umwandelt
- **DC/AC-Wandler (Wechselrichter)**
 Elektrisches Bauteil, das die Gleichspannung der HV-Batterie in eine dreiphasige Wechselspannung umwandelt, die je nach empfangenen Steuersignalen unterschiedlich ausgeprägt sein kann

Das reduzierte Volumen des integrierten Antriebsstrangs unterstützt den Wechsel von konventionellen Fahrzeugarchitekturen und -eigenschaften hin zu neuen Fahrzeug- und Mobilitätsanwendungen.

Quelle: Emadi 2005 (Handbook of Automotive Power Electronics and Motor Drives); Querom 2020 (Leistungselektronik im Elektroauto)



Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

SCALE-UP
E-DRIVE

Danke für ihre Aufmerksamkeit!

Hartha, 25. September 2025



M.Sc., M.Sc.
David Drexler



+49 (0) 152 21 730752



d.drexler@pem.rwth-aachen.de



Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

SCALE-UP
E-DRIVE

Demontage-Seminar Elektromotoren in Hartha

Kühlsystemen in elektrischen Antrieben

Hartha, 25. September 2025

Einleitung

Notwendigkeit von Kühlsystemen in elektrischen Antrieben



Verbesserung der Spitzenleistung

Die Spitzen- und **Dauerleistung** von Motoren wird durch die **thermische Belastbarkeit** verschiedener Motorkomponenten **begrenzt**. **Erhöhte Motortemperaturen** führen zum Beispiel zu einem **vorzeitigen Ausfall** der Isolationssysteme.



Wirkungsgrad des Motors

Der **elektrische Widerstand** von **Kupfer** hat einen **positiven Temperaturkoeffizienten**, d. h. je **höher** die **Motortemperatur**, desto **höher** der **Wicklungswiderstand** und desto **geringer** der **Wirkungsgrad** des **Motors**.



Downsizing

Eine **Verkleinerung** des Motoreinbauraums bei gleicher Ausgangsleistung führt zu einer **kleineren Oberfläche**, die für die Wärmeabfuhr zur Verfügung steht, und **erfordert daher** ein **leistungsfähigeres Kühlsystem**.

Ein **effizientes Kühlsystem** bildet die Grundlage für **leistungsstarke, effiziente** und **kostenreduzierte Elektromotoren**.

Relevante Motortopologien im Kontext der Elektromobilität

Generische Produktarchitektur und Funktion eines Elektromotors

Getriebe

- Wandlung von Drehzahl und Drehmoment
- Leistungsübertragung an Abtrieb

Leistungselektronik

- Bereitstellung eines dreiphasigen Drehstromfeldes

Stator

- Erzeugung eines elektromagnetischen Drehfeldes

Blechkpakete

- Gezielte Leitung des magnetischen Flusses
- Minderung von Verlusten

Rotor

- Aufbau eines Magnetfeldes
- Wandelt elektrische Energie in mechanische Energie

Gehäuse

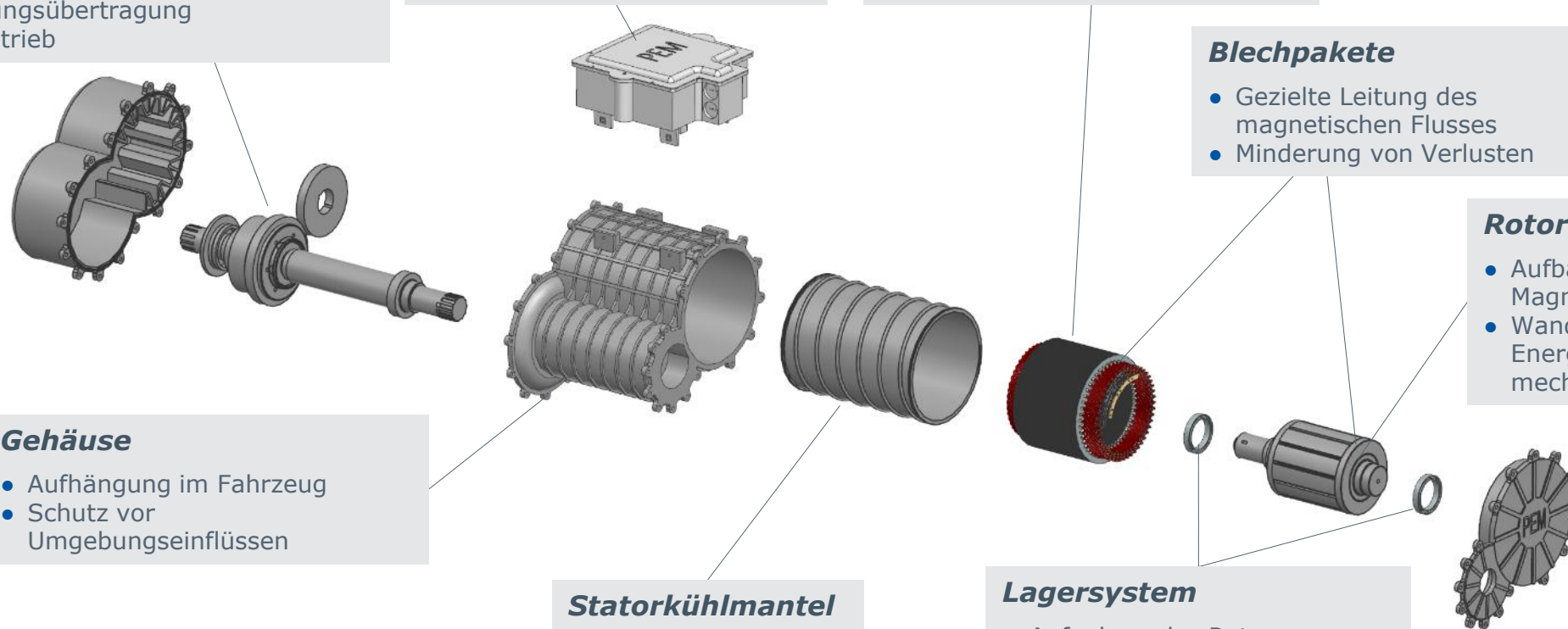
- Aufhängung im Fahrzeug
- Schutz vor Umgebungseinflüssen

Statorkühlmantel

- Kühlung des Stators

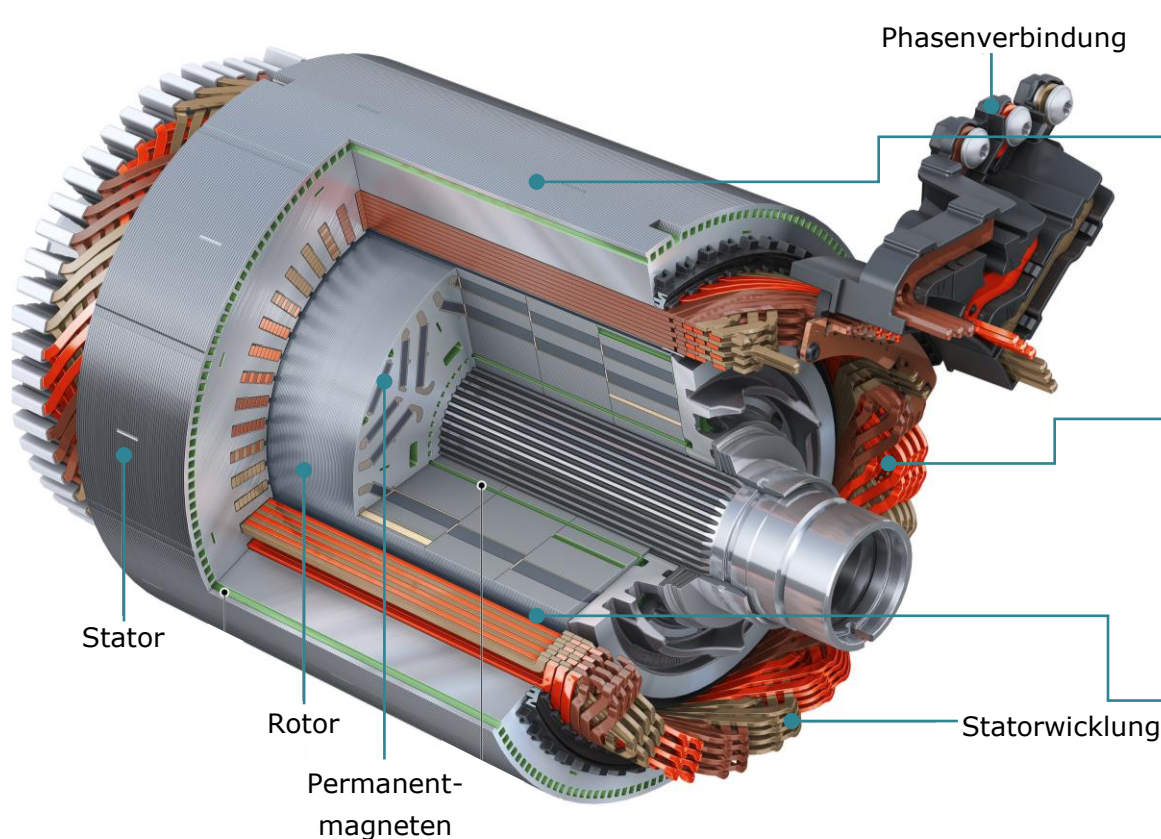
Lagersystem

- Aufnahme des Rotors
- Übertragung radialer Kräfte



Einleitung

Wärmequellen in elektrischen Traktionsantrieben



Eisenverluste

- Treten in den Statorlamellen auf und sind von der Drehzahl abhängig
- Unterteilt in Hysterese, Wirbelstrom und zusätzliche Verluste
- Erzeugen von Wärme in den allen geblechten Komponenten

Ohmsche Verluste

- Treten in den stromführenden Leitern aufgrund ihres elektrischen Widerstands auf
- Abhängig von dem spezifischen elektrischen Widerstand des Materials, der Länge und der Querschnittsfläche

Zusätzliche Verluste

- Reibungsverluste in den Lagern zur Aufnahme der Rotorwelle
- Belüftungsverluste im Luftspalt
- Abhängig von der Drehzahl sowie der Form des Rotors

Da **ein erheblicher Teil** der **Motorverluste** auf die **Statorwicklungen** entfällt, ist eine **effektive Kühlung** der Wicklung für den **effizienten** Betrieb von **Elektromotoren entscheidend**.

Quelle: Audi Mediacenter

Aktuelle Statorkühlkonzepte

Meistverkauftes BEV in Europa, USA und China in Q1 2025

Europa

Modell	Stückzahl in Q1 2025
Tesla Model Y	15.164
Tesla Model 3	12.500
VW ID.4	7.675
VW ID.7	7.438
Kia EV3	7.173
Renault 5	6.996
Skoda Enyaq	6.865
VW ID.3	6.384
BMW iX1	6.126
Audi Q6 e-tron	5.701

China

Modell	Stückzahl in Q1 2025
Geely (Geome) Xingyuan	89.215
Wuling Hongguang EV	86.946
Tesla Model Y	81.889
BYD-Möwe	79.094
Xiaomi SU7	75.869
Tesla Model 3	52.718
Xpeng Mona M03	47.130
Geely Panda	42.792
BYD Yuan Plus	39.839
Wuling Bingo	38.228

USA

Modell	Stückzahl in Q1 2025
Tesla Model Y	64.051
Tesla Model 3	52.520
Ford Mustang Mach-E	11.607
Chevrolet Equinox	10.329
Honda Prolog	9.561
Hyundai IONIQ 5	8.611
VW ID.4	7.663
Ford F-150 Lightning	7.187
BMW i4	7.125
Tesla Cybertruck	6.406

Quelle: pwc; JATO; CARSCOOPS

Aktuelle Statorkühlkonzepte

Meistverkauftes BEV in Europa, USA und China in Q1 2025

Europa

Modell	Stückzahl in Q1 2025
Tesla Model Y	15.164
Tesla Model 3	12.500
VW ID.4	7.675
VW ID.7	6.329
Kia EV3	5.561
Renault e	5.611
Skoda Enyaq	6.865
VW ID.3	6.384
BMW iX1	6.126
Audi Q6 e-tron	5.701

China

Modell	Stückzahl in Q1 2025
Geely (Geome) Xingyuan	89.215
Wuling Hongguang EV	86.946
Tesla Model Y	81.889
Tesla Model 3	52.718
Xpeng Mona M03	47.130
Geely Panda	42.792
BYD Yuan Plus	39.839
Wuling Bingo	38.228

USA

Modell	Stückzahl in Q1 2025
Tesla Model Y	64.051
Tesla Model 3	52.520
Ford Mustang Mach-E	11.607
VW ID.4	7.663
Ford F-150 Lightning	7.187
BMW i4	7.125
Tesla Cybertruck	6.406

Welche Statorkühlkonzepte werden in den meistverkauften BEVs in Europa, China und den USA im Q1 2025 eingesetzt?

Quelle: pwc; JATO; CARSCOOPS

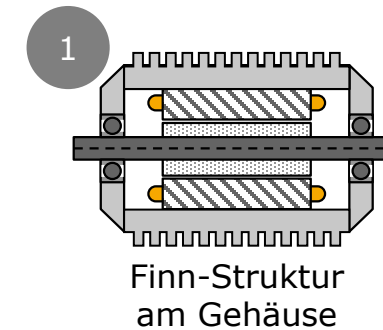
Aktuelle Statorkühlkonzepte

Luftgekühltes Statorgehäuse

Beschreibung der Technologie

- Das Gehäuse ist mit einer Rippenstruktur entlang des gesamten Mantels ausgestattet
- Zwischen benachbarten Rippen werden Luftkanäle gebildet, durch die die Umgebungsluft strömt
- Die Wärme des Motors wird über die Kühlrippen an die Umgebung abgeleitet

Schematische Skizze der Technologievarianten



Qualitative Bewertung¹

Leistung der Kühlung	1	2	3	4	5
Betriebskosten	1	2	3	4	5
Produktionskosten	1	2	3	4	5
Technischer Integrationsaufwand	1	2	3	4	5

1 - 1 = niedrig / 5 = hoch;

Produktbeispiele



Wuling Hong Guang Mini EV

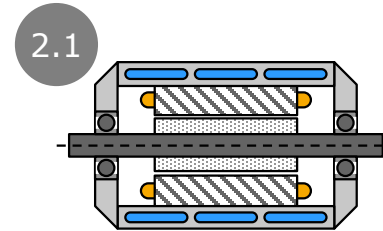
Aktuelle Statorkühlkonzepte

Wassermantelkühlung

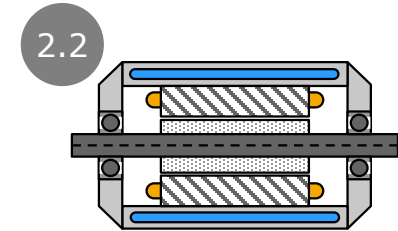
Beschreibung der Technologie

- Gehäuse oder ein separater Kühlmantel ist mit Kühlkanälen ausgestattet
- Kühlmittel fließt durch Kanäle und absorbiert die von der Wicklung auf das Blechpaket übertragene Wärme
- Kühlkanäle verlaufen spiralförmig oder axial um den Stator

Schematische Skizze der Technologievarianten



Spiralförmige
Kühlkanäle



Axiale
Kühlkanäle

Qualitative Bewertung¹

Leistung der Kühlung	1	2	3	4	5
Betriebskosten	1	2	3	4	5
Produktionskosten	1	2	3	4	5
Technischer Integrationsaufwand	1	2	3	4	5

1 - 1 = niedrig / 5 = hoch; 2 - Benchmarking-Studie PEM RWTH; 3 - BMW Group

Produktbeispiele



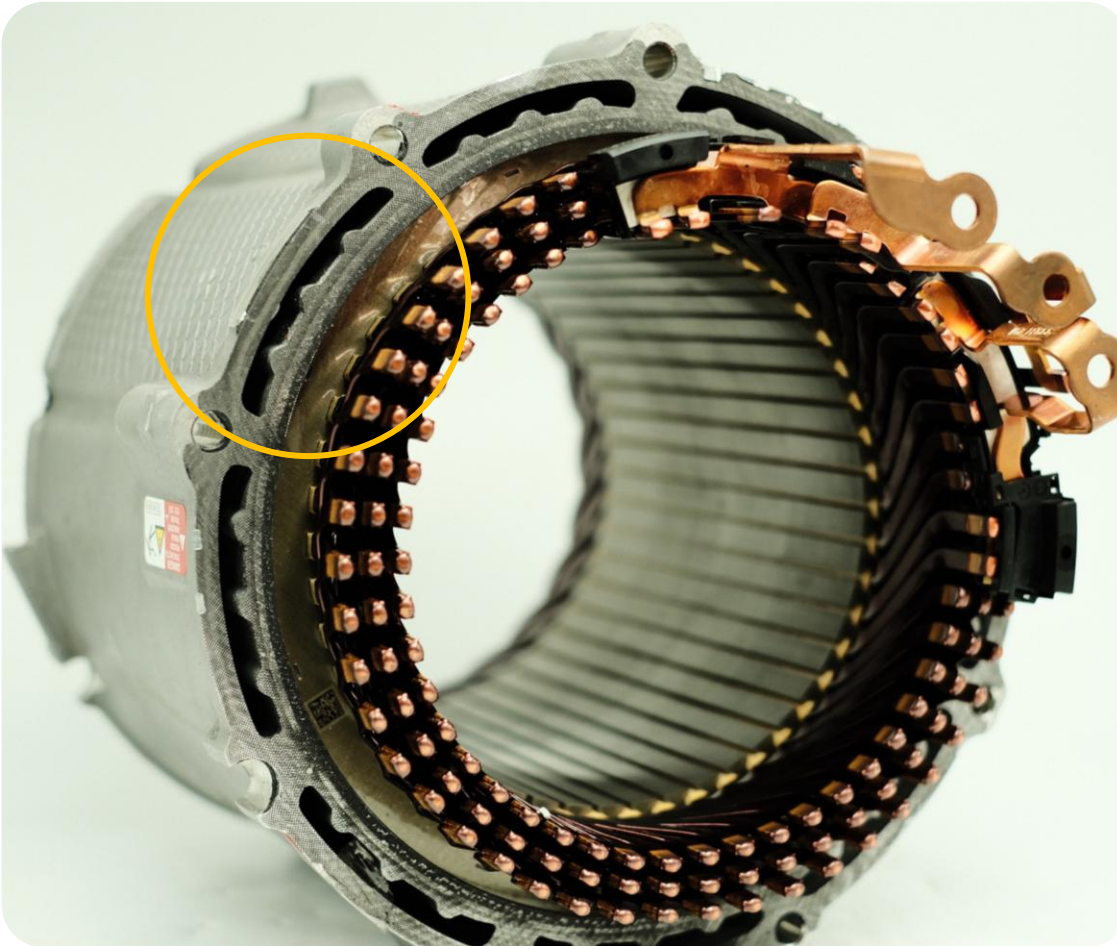
VW ID.3 (APP310)²



BMW iX1, i4 (5^{te} Generation)³

Aktuelle Statorkühlkonzepte

Wassermantelkühlung – DeepDive VW APP310



- Zur Kühlung der Statorwicklung und des Statorblechpakets wird Wasser durch Kühlkanäle gepumpt, die axial zur Drehachse im Gehäuse verlaufen
- Die Verbindung zwischen den benachbarten Kühlkanälen wird durch Aussparungen in der Seitenwand gewährleistet
- Die Kühlkanäle sind axial durch die beiden Lagerschilde verschlossen
- Um die Dichtheit zu gewährleisten, wird zwischen Lagerschild und Gehäuse eine Dichtungsmasse aufgetragen
- Das Kühlmittel wird auch über die Lagerschilde dem Kühlmantel zu- und abgeführt

Quelle: Benchmarking-Studie PEM RWTH

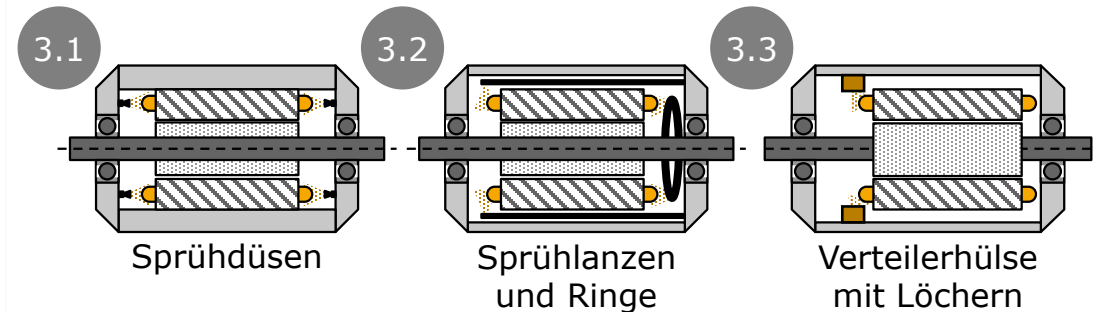
Aktuelle Statorkühlkonzepte

Direkte Wickelkopfkühlung

Beschreibung der Technologie

- Das Öl wird mit Sprühdüsen, Ringen, Lanzen oder Hülsen auf die Statorwicklung gesprüht
- Das gespritzte Öl wird im Inneren des Gehäuses aufgefangen
- Die Wärme wird über einen Wärmetauscher abgeleitet und das Öl wird in den Kühlkreislauf zurückgeführt

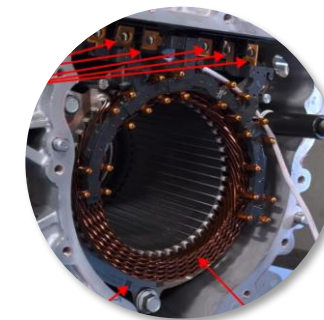
Schematische Skizze der Technologievarianten



Qualitative Bewertung¹

Leistung der Kühlung	1	2	3	4	5
Betriebskosten	1	2	3	4	5
Produktionskosten	1	2	3	4	5
Technischer Integrationsaufwand	1	2	3	4	5

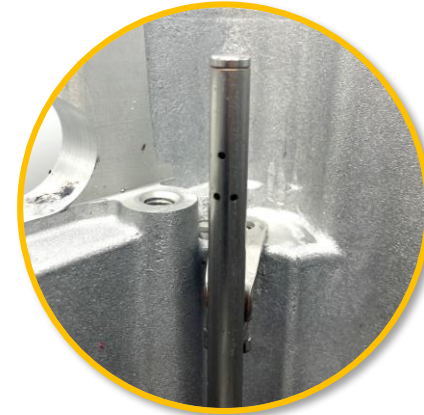
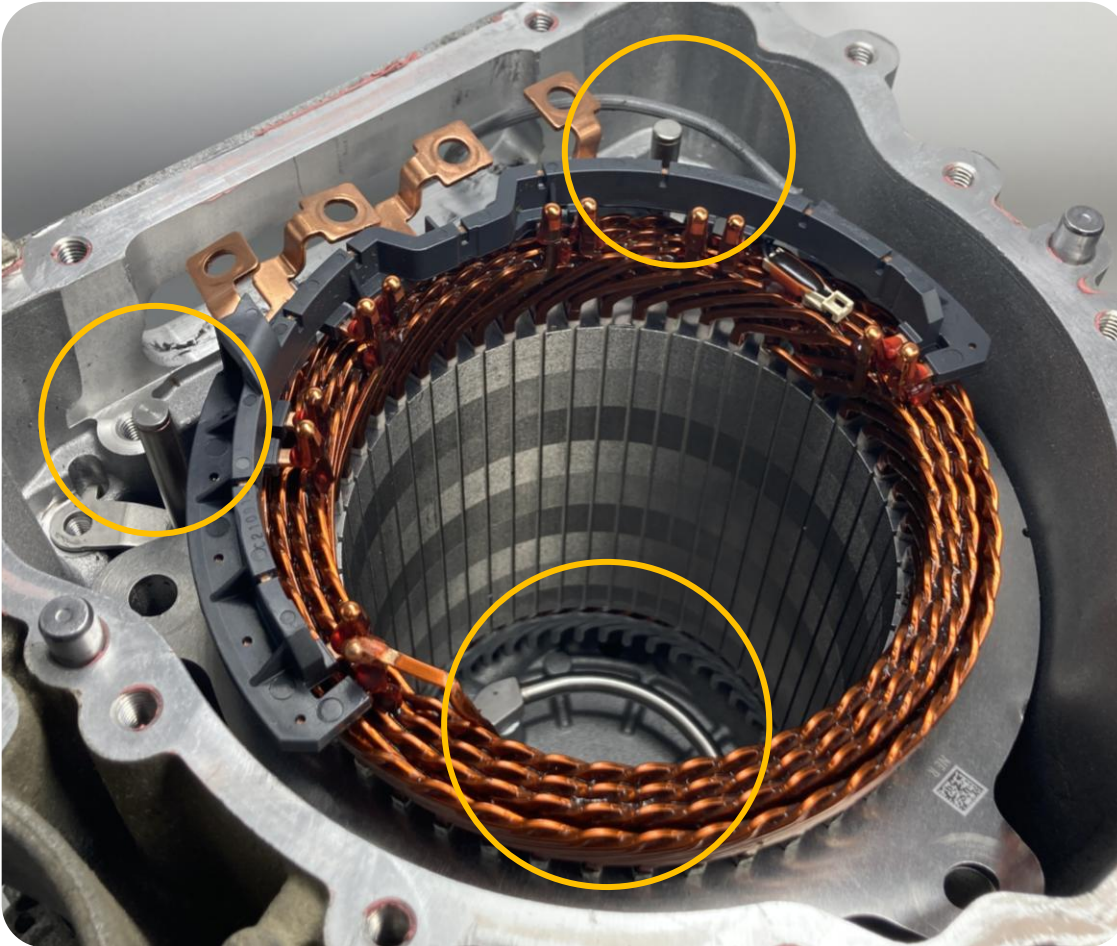
Produktbeispiele



1 - 1 = niedrig / 5 = hoch; 2 - Benchmarking-Studie PEM RWTH; 3 - The Autopian; 4 - Marklines/ Munro & Associates

Aktuelle Statorkühlkonzepte

Direkte Wickelkopf Kühlung – DeepDive: Hyundai E-GMP-Plattform



- Der Stator ist mit Schrauben am Gehäuse befestigt
- Links und rechts der Phasenanschlüsse befinden sich zwei Kühllanzen, die von der Unterseite des Gehäuses bis zum Wickelkopf reichen
- Die Kühllanzen haben oben und unten kleine Löcher, durch die Öl auf die beiden Wickelköpfe (Biege- und Schweißseite) gesprüht wird
- Zusätzlich zu den Kühllanzen wird das Kühlmittel von der Innenseite des Stators über einen Sprühling auf die Wicklung (Schweißseite) aufgebracht
- Ähnlich wie bei den Lanzen ist der Ring ein dünnes Rohr mit kleinen Löchern

Quelle: Benchmarking-Studie PEM RWTH

Aktuelle Statorkühlkonzepte

Direkte Wickelkopf- und Blechpaketkühlung

Beschreibung der Technologie

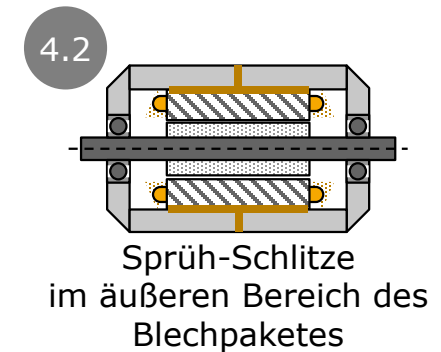
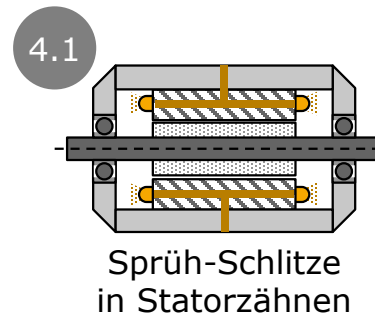
- Öl wird über Kühlkanäle im Blechpakets auf die Wicklung gesprüht
- Blechpaket wird durch den Öl-Durchfluss gekühlt
- Die Kühlkanäle können an der Außenkante des Blechpaketes (4.2) oder im Bereich der Zähne (4.1) angeordnet sein
- Funktionsintegration der Kühlung in das Statorblechpaket

Qualitative Bewertung¹

Leistung der Kühlung	1	2	3	4	5
Betriebskosten	1	2	3	4	5
Produktionskosten	1	2	3	4	5
Technischer Integrationsaufwand	1	2	3	4	5

1 - 1 = niedrig / 5 = hoch; 2 - Benchmarkingstudie PEM RWTH; 3 - AUDI AG

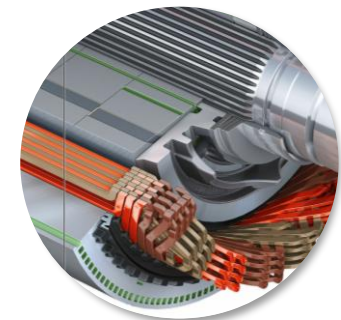
Schematische Skizze der Technologievarianten



Produktbeispiele



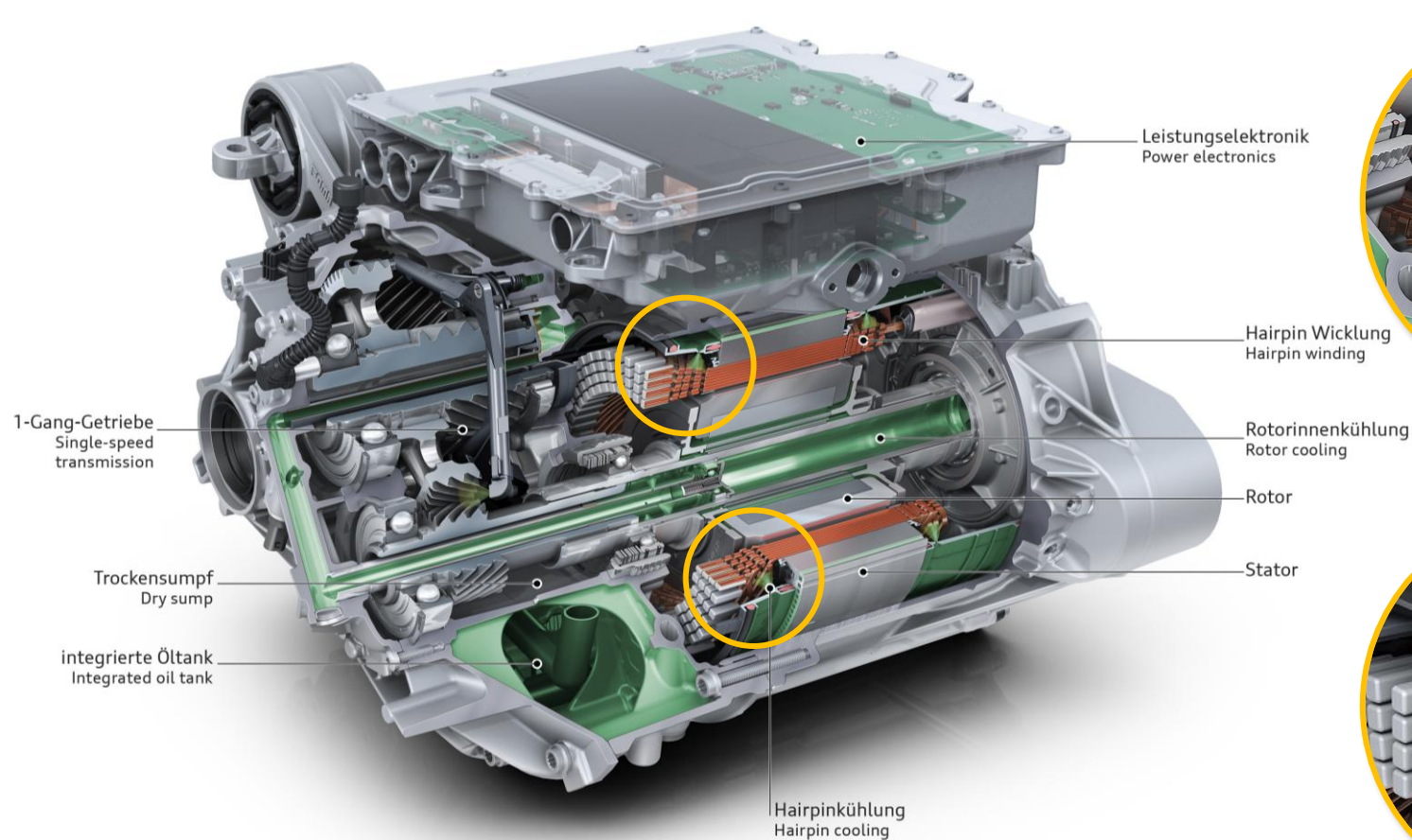
Tesla Model 3/ Y/ Cyber Truck²



Audi Q6 e-tron (PPE-Plattform)³

Aktuelle Statorkühlkonzepte

Direkte Wickelkopf- und Blechpaketkühlung – DeepDive: Audi Q6 e-tron (PPE-Plattform)



- Kühlmittel wird durch Aussparungen im Außenbereich des Statorblechpakets in Richtung Nutausslass transportiert und in Kammer gesammelt
- Kammer wird durch Hülse gebildet, die zum Gehäuse und dem Statorblechpaket abgedichtet ist
- Hülse verläuft um den gesamten Wickelkopf der Statorwicklung
- Hülse ist in regelmäßigen Abständen mit kleinen Düsen versehen, die die axiale Strömung des Kühlmittels im Statorblechpaket in eine radiale Strömung in Richtung des Wickelkopfes umwandeln

Quelle: AUDI AG

Aktuelle Statorkühlkonzepte

Wassermantel- und direkte Wickelkopfkuhlung

Beschreibung der Technologie

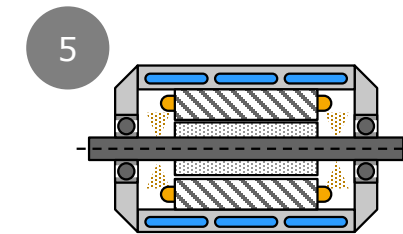
- Direkte Wickelkopfkuhlung und Wasserkühlmantel mit parallelen, separaten Kühlkreisläufen
- Der Wassermantel wickelt sich spiralförmig um den Stator und das Öl wird durch Löcher in der rotierenden Rotorwelle auf die Statorwicklung und den Rotor gesprüht
- Die physikalische Trennung der Medien erfordert eine komplexe Konstruktion und gegebenenfalls die doppelte Anzahl von Pumpensystemen

Qualitative Bewertung¹

Leistung der Kühlung	1	2	3	4	5
Betriebskosten	1	2	3	4	5
Produktionskosten	1	2	3	4	5
Technischer Integrationsaufwand	1	2	3	4	5

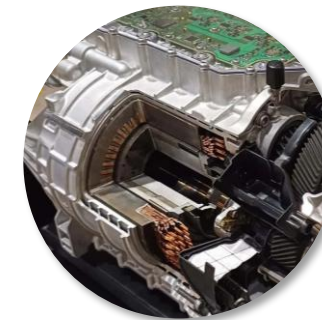
1 - 1 = niedrig / 5 = hoch; 2 - Volkswagen

Schematische Skizze der Technologievarianten



Axialer Kühlmantel im Gehäuse und Sprühdüsen in Rotorwelle

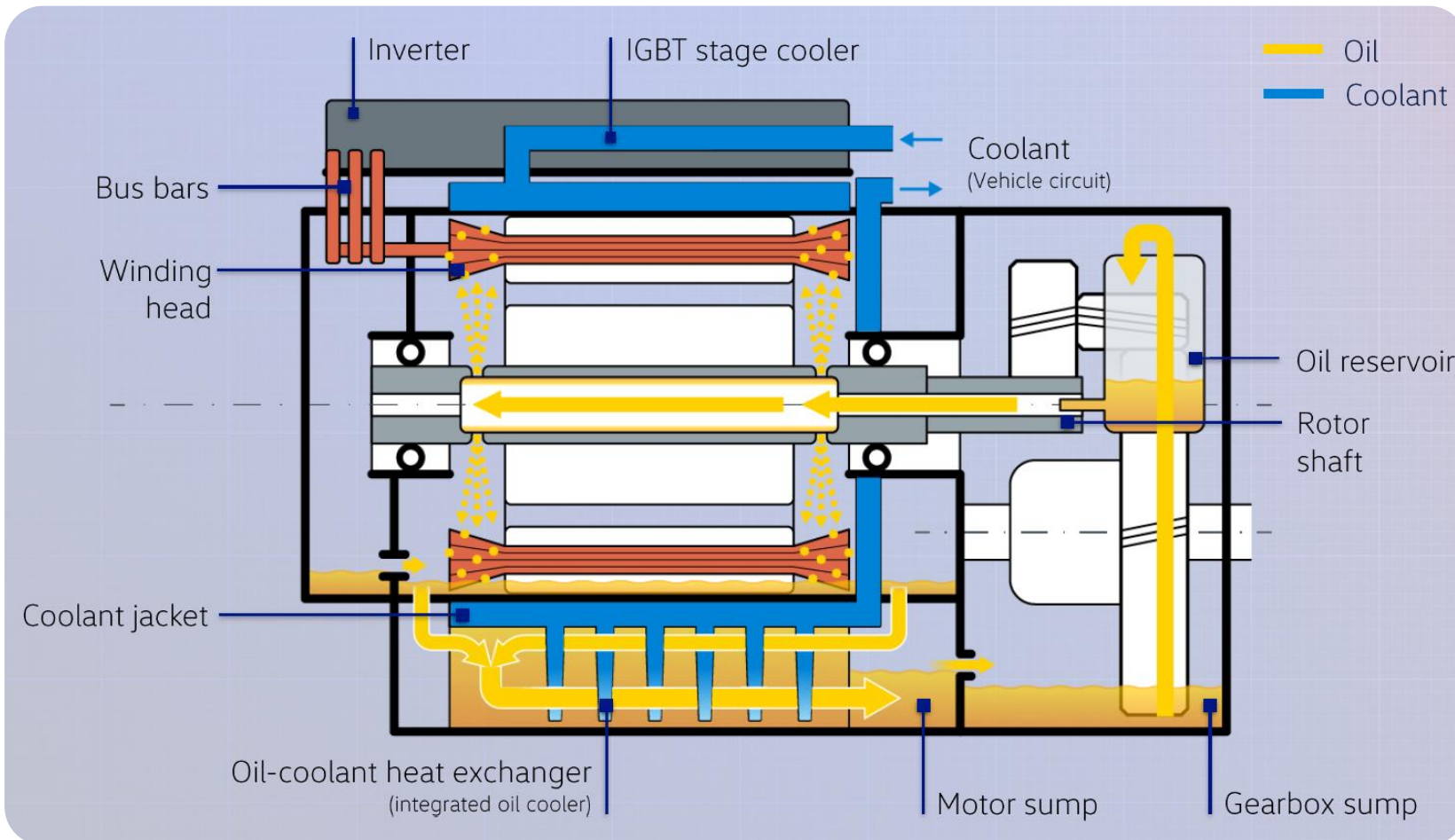
Produktbeispiele



VW ID.4 , ID.7, Skoda Enyaq (APP550)²

Aktuelle Statorkühlkonzepte

Wassermantel- und direkte Wickelkopfkühlung – DeepDive: Volkswagen APP550 (MEB-Plattform)



- Das Getriebeöl wird über einen im Getriebe integrierten Pumpmechanismus in die Rotorhohlwelle gepumpt
- Rotorhohlwelle hat in Höhe der beiden Wicklungsenden Aussparungen, durch die das Öl auf die Wicklung gesprüht wird
- Von der Wicklung wird das erhitzte Öl in ein Wärmetauscher-Labyrinth geleitet, wo die Wärme an den Wasserkühlkreislauf übertragen wird
- Der Wasserkühlkreislauf dient der Mantelkühlung
- Magnet im Öl-Sumpf filtert metallischen Abrieb aus dem Getriebe

Quelle: Volkswagen - APP550 (MEB-Plattform)

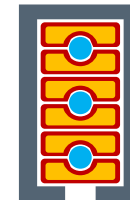
Zukünftige Statorkühlkonzepte

Nächster Entwicklungsschritt in der Stator-Kühltechnik: Direkte Nut-Kühlung

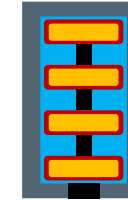
Beschreibung der Technologie

- Das Kühlmittel wird durch die Statornut geleitet und umgibt die Wicklung vollständig
- Die gesamte Nut kann mit Kühlmittel gefüllt oder es können ein oder mehrere Kühlkanäle in der Nut platziert werden
- Der Kühlkanal kann durch die Form der Leiter oder durch einen separaten Kühlschlauch oder -rohr gebildet werden

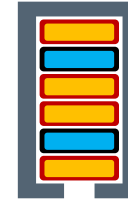
Schematische Skizze der Technologievarianten



Kühlkanal gebildet durch Leiterform



Fluten der gesamten Statornut

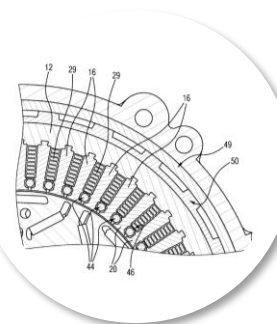


Kühlkanal gebildet durch Rohrelement

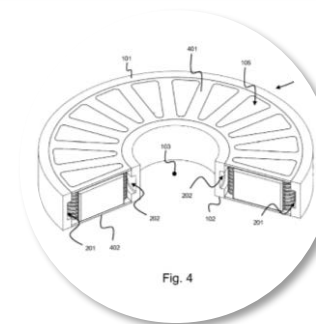
Qualitative Bewertung¹

Leistung der Kühlung	1	2	3	4	5
Betriebskosten	1	2	3	4	5
Produktionskosten	1	2	3	4	5
Technischer Integrationsaufwand	1	2	3	4	5

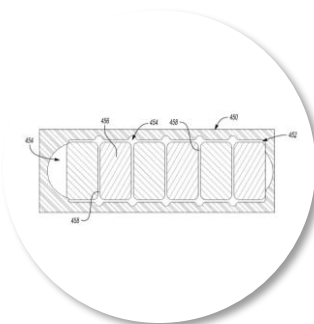
Produktbeispiele



Vitesco



Magnax BV

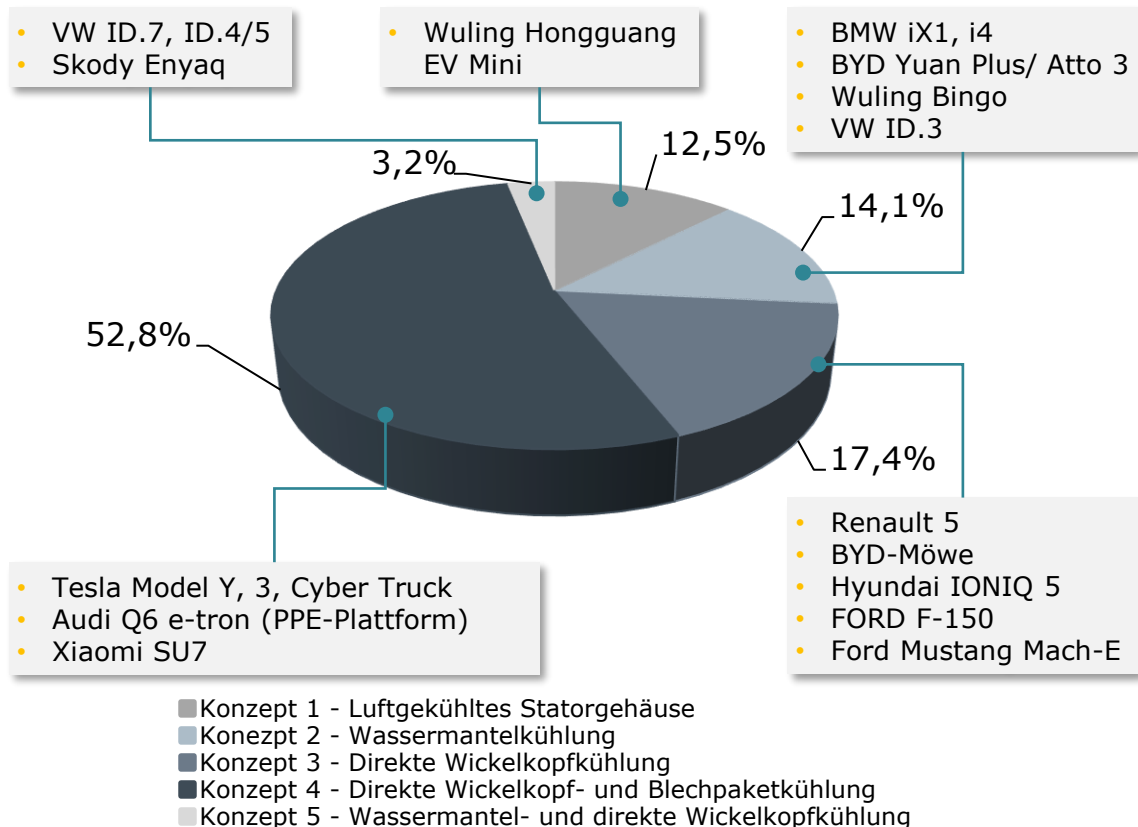


Ford

Marktverteilung der Statorkühlkonzepte

Analyse der meistverkauften BEV in Europa, USA und China Q1 2025

Anteil des jeweiligen Kühlkonzepts am gesamten betrachteten Marktvolumen



- Luftgekühlte Elektroantriebe in Micro-/A-Segmentfahrzeugen, aber nur für geringere Leistungsanforderungen geeignet
- Wassermantelkühlung wird nach wie vor hauptsächlich in Fahrzeugen eingesetzt, bei denen die Luftkühlung nicht mehr ausreichend ist
- Direktwicklungskühlung setzt sich in Asien und auch in Fahrzeugmodellen europäischer Hersteller zunehmend durch
- Komplexe Kühlsysteme, wie z. B. "Wassermantel- und direkte Wickelkopf- und Blechpaketkühlung" werden zunehmend eingesetzt
- Das Statorkühlkonzept "Direkte Wickelkopf- und Blechpaketkühlung" ist das im Rahmen dieser Studie am häufigsten verwendete
- Die Funktionsintegration der Kühlung in das Statorblechpaket führt zu erhöhten Dichtungsanforderungen

* - Von der Bewertung ausgeschlossen, da keine Informationen zur Kühltechnik ermittelt werden konnten: Chevrolet Equinox, Honda Prologue, Geely (Geome) Xingyuan, Xpeng Mona M03, Geely Panda



Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

SCALE-UP
E-DRIVE

Danke für ihre Aufmerksamkeit!

Hartha, 25. September 2025



M.Sc., M.Sc.
David Drexler



+49 (0) 152 21 730752



d.drexler@pem.rwth-aachen.de

Agenda

Demontage-Seminar Elektromotoren in Hartha

01

Begrüßung und Sicherheitsunterweisung
09:00 Uhr

04

Kaffeepause
11:00 Uhr

02

Integrierte Antriebssysteme im Überblick
09:30 Uhr

05

Produktionstechnologien im Vergleich
11:30 Uhr

03

Praxiseinblick „Demontage eines E-Antriebs“
10:15 Uhr

06

Praxiseinblick „Vergleich aktueller Motoren“
12:15 Uhr

07

Abschlussdiskussion, Feedback und Rundgang
13:30 Uhr

Agenda

Demontage-Seminar Elektromotoren in Hartha

01

Begrüßung und Sicherheitsunterweisung
09:00 Uhr

02

Integrierte Antriebssysteme im Überblick
09:30 Uhr

03

Praxiseinblick „Demontage eines E-Antriebs“
10:15 Uhr

04

Kaffeepause
11:00 Uhr

05

Produktionstechnologien im Vergleich
11:30 Uhr

06

Praxiseinblick „Vergleich aktueller Motoren“
12:15 Uhr

07

Abschlussdiskussion, Feedback und Rundgang
13:30 Uhr

Agenda

Demontage-Seminar Elektromotoren in Hartha

01

Begrüßung und Sicherheitsunterweisung
09:00 Uhr

04

Kaffeepause
11:00 Uhr

02

Integrierte Antriebssysteme im Überblick
09:30 Uhr

05

Produktionstechnologien im Vergleich
11:30 Uhr

03

Praxiseinblick „Demontage eines E-Antriebs“
10:15 Uhr

06

Praxiseinblick „Vergleich aktueller Motoren“
12:15 Uhr

07

Abschlussdiskussion, Feedback und Rundgang
13:30 Uhr



Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

SCALE-UP
E-DRIVE

Demontage-Seminar Elektromotoren in Hartha

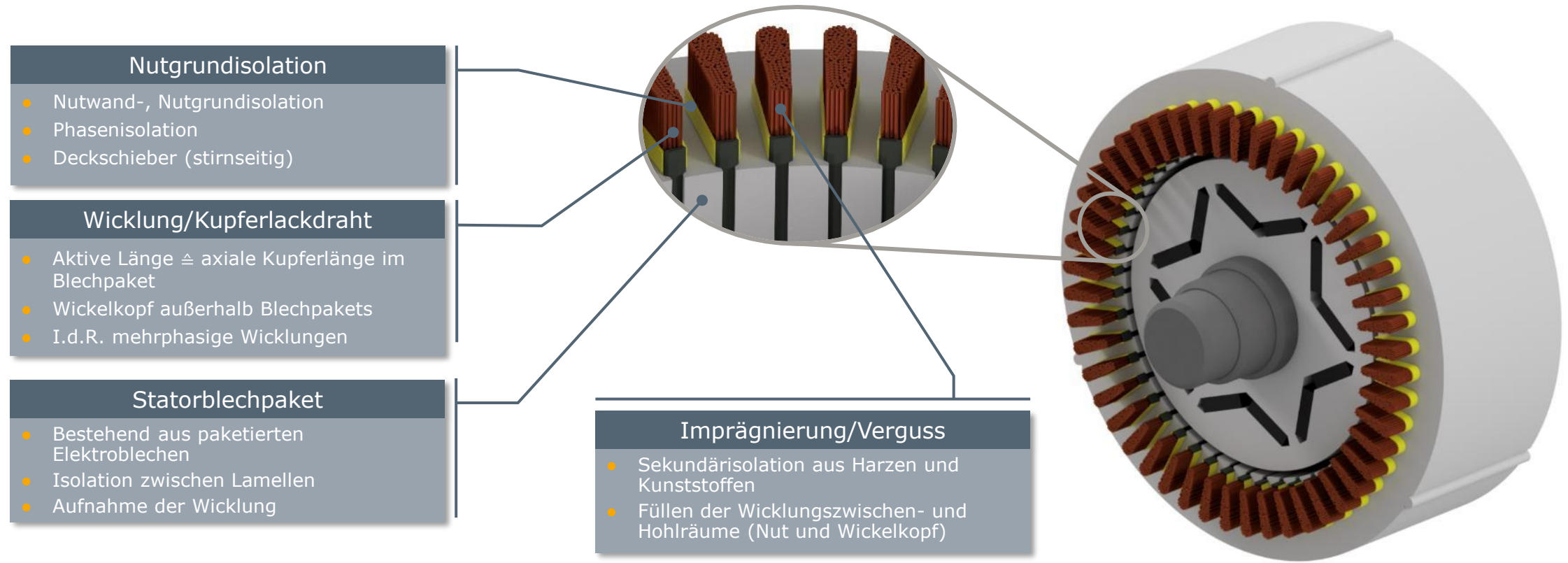
Wickeltechnologien im Vergleich

Hartha, 25. September 2025

Wickeltechnologien im Vergleich

Grundlegende Wicklungsterminologie

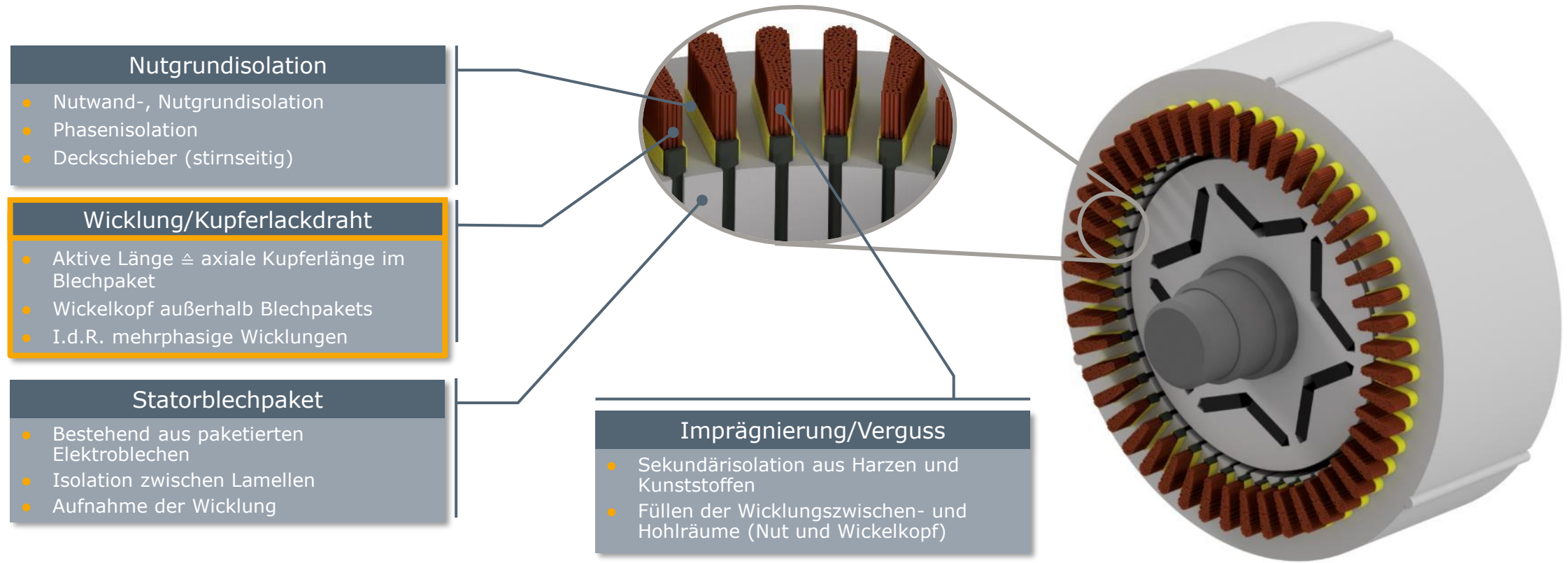
Recap: Grundlegender Statoraufbau



Wickeltechnologien im Vergleich

Grundlegende Wicklungsterminologie

Recap: Grundlegender Statoraufbau

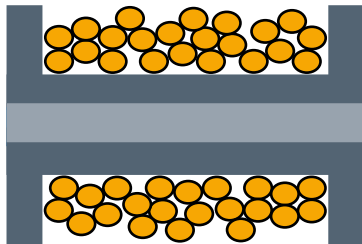


Wickeltechnologien im Vergleich

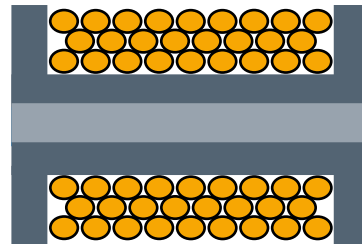
Grundlegende Wicklungsterminologie

Wicklungsschemata

Wilde Wicklung



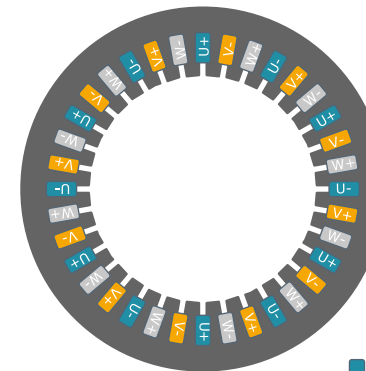
Orthozyklische Wicklung



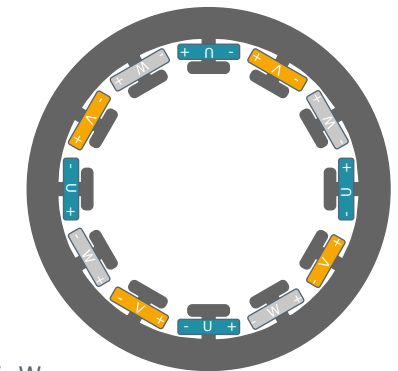
	Wilde Wicklung	Orthozyklische Wicklung
Mechanischer Füllfaktor	0,65 – 0,75	~0,91
Elektrische Eigenschaften	Schwankend	Konstant
Wärmeleitfähigkeit	Gering	Gut
Mechanische Stabilität	Gering	Hoch

Wicklungstypen

Verteilte Wicklung



Konzentrierte Wicklung



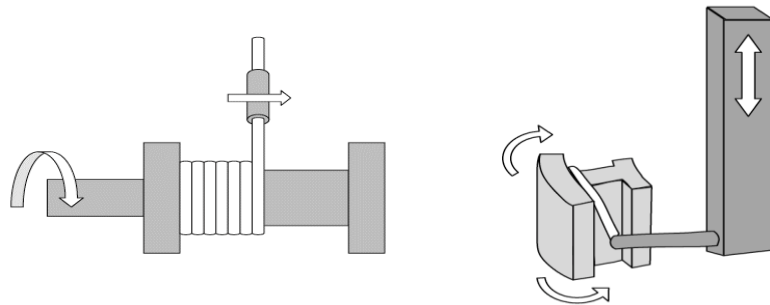
Phasen U, V, W

	Verteilte Wicklung	Konzentrierte Wicklung
Drehmomentdichte	↗	↘
Drehmomentwelligkeit	↘	↗
Wickelkopfhöhe	↗	↘
Kupfer- und Wicklungsverlust	↘	↗

Wickeltechnologien im Vergleich

Aktuelle Wickelverfahren – Übersicht

Direkte Wickelverfahren

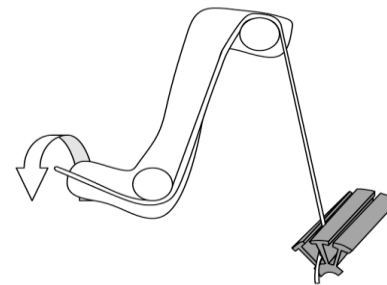


Linearwickeln

- Rotation des Formkörpers
- Lineare Drahtverteilung
- Orthozyklische Drahtverlegung möglich
- + Kurze Taktzeit und gute Parallelisierbarkeit
- + Orthozyklische Drahtablage
- Nur für konzentrierte Wicklung

Nadelwickeln

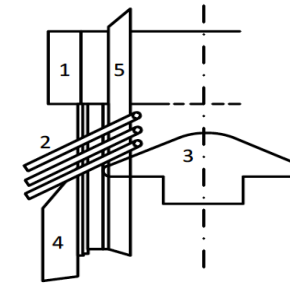
- Direktes Wickeln des Drahtes mittels Nadel
- Platz für Nadeldurchfahrt berücksichtigen
- + Hohe Flexibilität
- + Definierte Drahtführung
- + Paralleles Wickeln mehrerer Drähte
- Füllfaktor begrenzt
- Hohe Drahtbelastung



Flyerwickeln

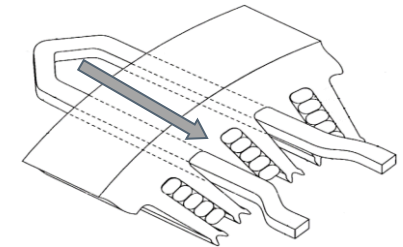
- Rotierender Flyer um feststehenden Formkörper
- Abwurf des Drahtes
- + Kurze Taktzeit
- + Relativ variantenflexibel
- Bei direktem Wickeln nur konzentrierte und wilde Wicklung möglich
- Niedrige Kupferfüllgrad

Indirekte Wickelverfahren



Flyerwickeln & Einziehen

- Externes Spulnwickeln und einziehen mit speziellem Werkzeug
- + Verteilte Wicklung möglich
- + Hohe Kupferfüllgrade
- Lange Taktzeiten
- Hohe Drahtbeanspruchung
- Breiter Wickelkopf
- Hohe Anlageninvestitionen



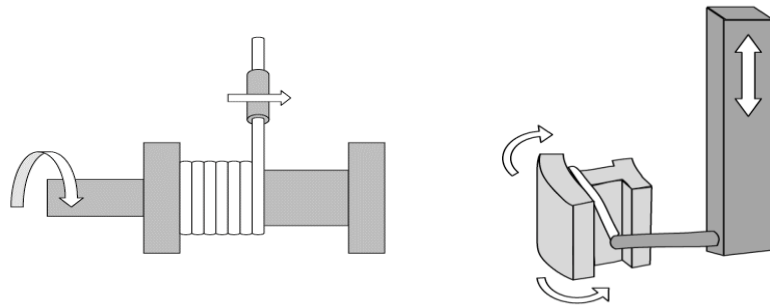
Flachdrahttechnologie

- Externes Biegen mit automatisiertem Einstecken
- Biegen und Schweißen zur Kontaktierung
- + Hohe Kupferfüllgrade
- + Gute Automatisierbarkeit
- Aufwändige Prozesstechnik
- Geringe Flexibilität

Wickeltechnologien im Vergleich

Aktuelle Wickelverfahren – Übersicht

Direkte Wickelverfahren

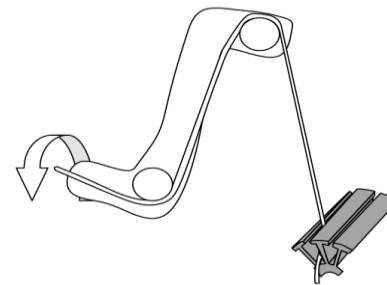


Linearwickeln

- Rotation des Formkörpers
- Lineare Drahtverteilung
- Orthozyklische Drahtverlegung möglich
- + Kurze Taktzeit und gute Parallelisierbarkeit
- + Orthozyklische Drahtablage
- Nur für konzentrierte Wicklung

Nadelwickeln

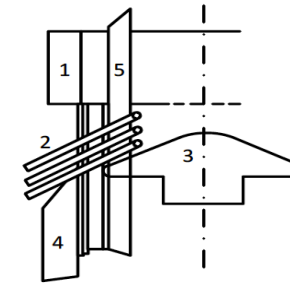
- Direktes Wickeln des Drahtes mittels Nadel
- Platz für Nadeldurchfahrt berücksichtigen
- + Hohe Flexibilität
- + Definierte Drahtführung
- + Paralleles Wickeln mehrerer Drähte
- Füllfaktor begrenzt
- Hohe Drahtbelastung



Flyerwickeln

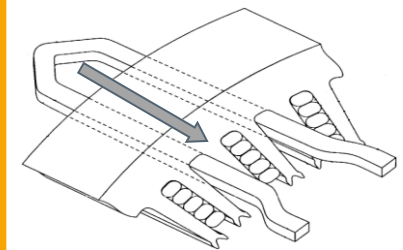
- Rotierender Flyer um feststehenden Formkörper
- Abwurf des Drahtes
- + Kurze Taktzeit
- + Relativ variantenflexibel
- Bei direktem Wickeln nur konzentrierte und wilde Wicklung möglich
- Niedrige Kupferfüllgrad

Indirekte Wickelverfahren



Flyerwickeln & Einziehen

- Externes Spulnwickeln und einziehen mit speziellem Werkzeug
- + Verteilte Wicklung möglich
- + Hohe Kupferfüllgrade
- Lange Taktzeiten
- Hohe Drahtbeanspruchung
- Breiter Wickelkopf
- Hohe Anlageninvestitionen



Flachdrahttechnologie

- Externes Biegen mit automatisiertem Einstecken
- Biegen und Schweißen zur Kontaktierung
- + Hohe Kupferfüllgrade
- + Gute Automatisierbarkeit
- Aufwändige Prozesstechnik
- Geringe Flexibilität

Wickeltechnologien im Vergleich

Flachdrahttechnologie



Wirtschaftlichkeit

- Hohe Automatisierbarkeit
- Hohe Skalierbarkeit
- Reduzierte Kosten



Serientechnologie



Prozessfähigkeit

- Keine stochastische Wicklung
- Deterministische Montageprozesse
- Deterministische Schweißprozesse



Prozesse Automobilindustrie



Wickeldesign

- Zunehmender Leiterquerschnitt
- Hohe Stromstärken möglich
- Erhöhter Skin- und reduzierte Proximity-Effect
- Gleichbleibende Flexibilität



Drehmomentstarke Motoren



Technologische Reife

- Industrialisierung weiterhin im Gange
- Hohes wirtschaftliches und technologisches Potenzial
- Produktionstechnik als Enabler für die Produktentwicklung

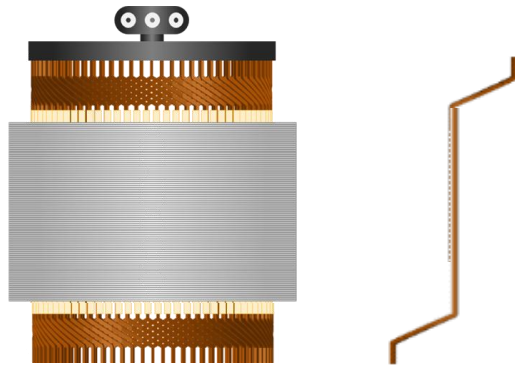


Austausch entlang Wertschöpfung

Wickeltechnologien im Vergleich

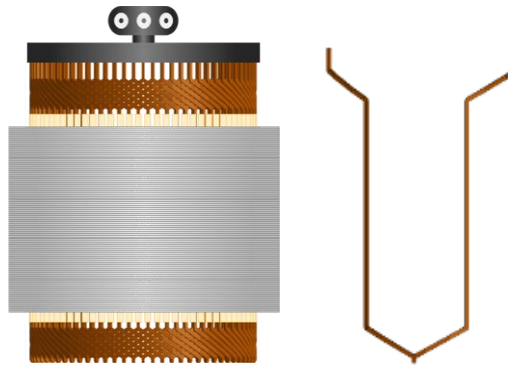
Flachdrahttechnologie – Übersicht

I-Pin



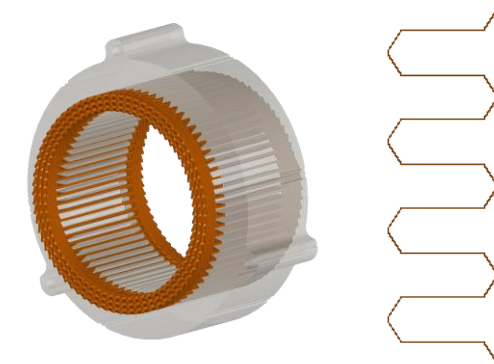
- Beidseitig geschränkt und verschweißte Wicklung (2x Lead-Site)
- + Aufgrund beidseitiger großer Oberfläche erhöhte Kühlmöglichkeit
- + Entfall kostenintensiver Biege- und Twist-Vorgänge
- + Hohe Technologiereife
- Beidseitig erhöhte Wickelkopfhöhe
- Hohe Anzahl an Schweißpunkten

U-Hairpin



- Einseitig geschränkt und verschweißte Wicklung (1x Lead-Site)
- Gegenüberliegende Wickelkopf mit End-turn/geschlossener Seite des Hairpins
- + Geringe Wickelkopfhöhe auf End-Turnseite
- + Ermöglicht komplexe Wickelschemata
- + Reduzierte Schweißpunktanzahl
- + Hohe Technologiereife
- Komplexe Biege- und Twistvorgänge

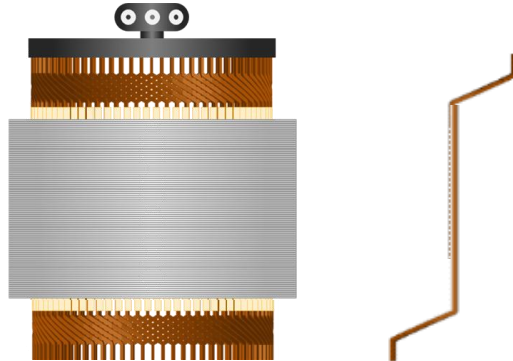
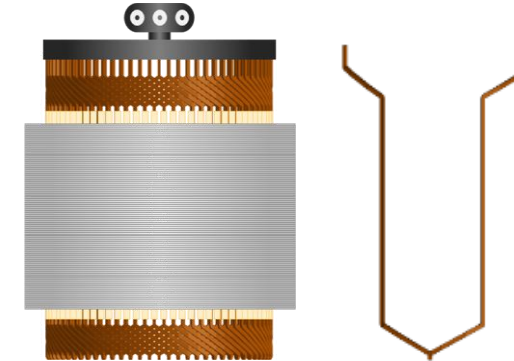
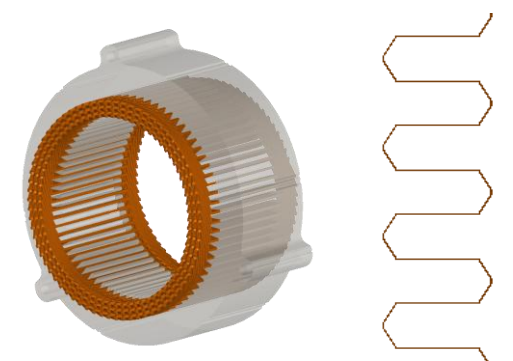
Kontinuierliche Hairpinwicklung



- Kont. Wicklung mit einseitig, teilweise verschweißter Wicklung (1x Lead-Site)
- Gegenüberliegende Wickelkopf mit End-turn/geschlossener Seite des Hairpins
- + Beidseitig geringe Wickelkopfhöhe
- + Deutliche Reduktion der Anzahl an Schweißpunkten
- Erhöhte Verluste durch Nutöffnungsdesign
- Komplexität der Biege-/ Montagevorgänge

Wickeltechnologien im Vergleich

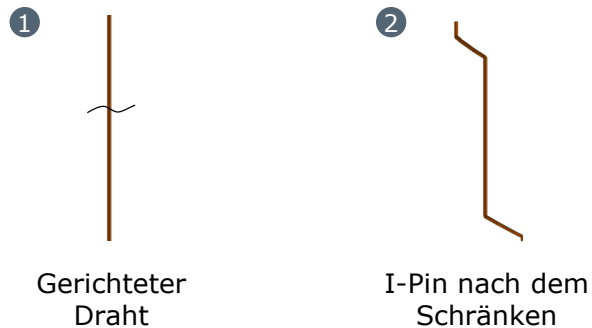
Flachdrahttechnologie – Übersicht

I-Pin	U-Hairpin	Kontinuierliche Hairpinwicklung
		
<ul style="list-style-type: none">• Beidseitig geschränkt und verschweißte Wicklung (2x Lead-Site)+ Aufgrund beidseitiger großer Oberfläche erhöhte Kühlmöglichkeit+ Entfall kostenintensiver Biege- und Twist-Vorgänge+ Hohe Technologiereife– Beidseitig erhöhte Wickelkopfhöhe– Hohe Anzahl an Schweißpunkten	<ul style="list-style-type: none">• Einseitig geschränkt und verschweißte Wicklung (1x Lead-Site)• Gegenüberliegende Wickelkopf mit End-turn/geschlossener Seite des Hairpins+ Geringe Wickelkopfhöhe auf End-Turnseite+ Ermöglicht komplexe Wickelschemata+ Reduzierte Schweißpunktanzahl+ Hohe Technologiereife– Komplexe Biege- und Twistvorgänge	<ul style="list-style-type: none">• Kont. Wicklung mit einseitig, teilweise verschweißter Wicklung (1x Lead-Site)• Gegenüberliegende Wickelkopf mit End-turn/geschlossener Seite des Hairpins+ Beidseitig geringe Wickelkopfhöhe+ Deutliche Reduktion der Anzahl an Schweißpunkten– Erhöhte Verluste durch Nutöffnungsdesign– Komplexität der Biege-/ Montagevorgänge

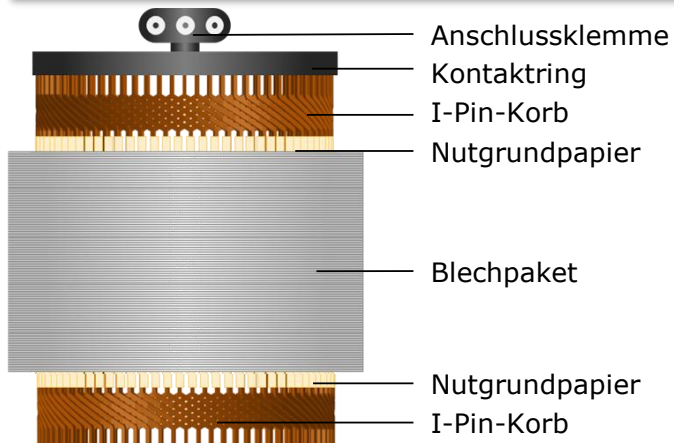
Wickeltechnologien im Vergleich

Flachdrahttechnologie – I-Pin

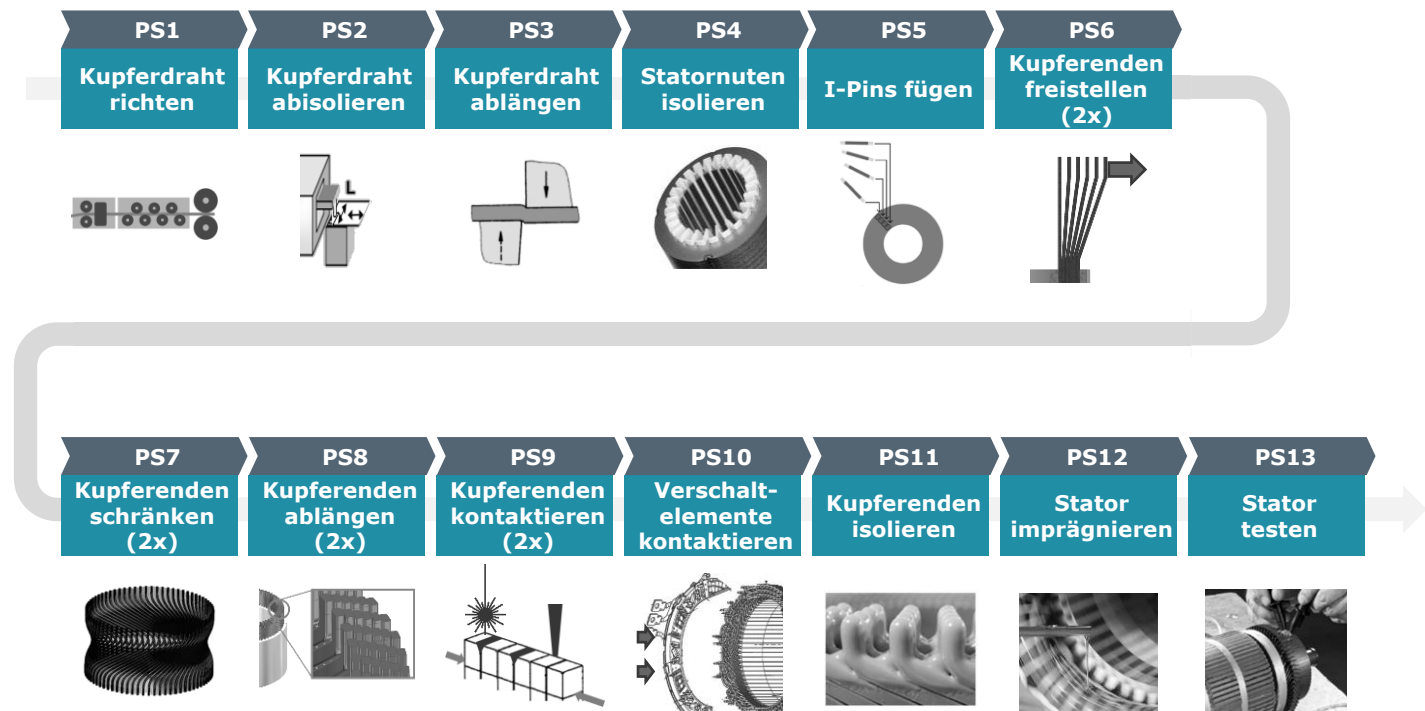
Geometrie eines I-Pins



Ausbau eines I-Pin-Stators



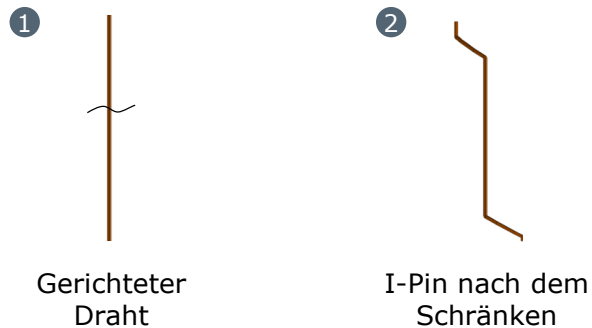
Generische Prozesskette der I-Pin-Technologie



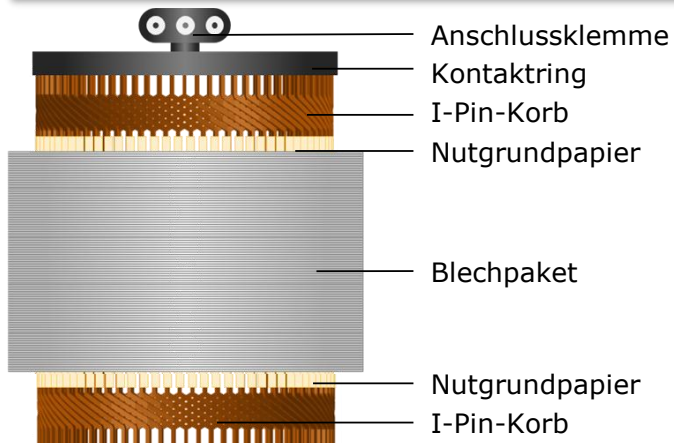
Wickeltechnologien im Vergleich

Flachdrahttechnologie – I-Pin

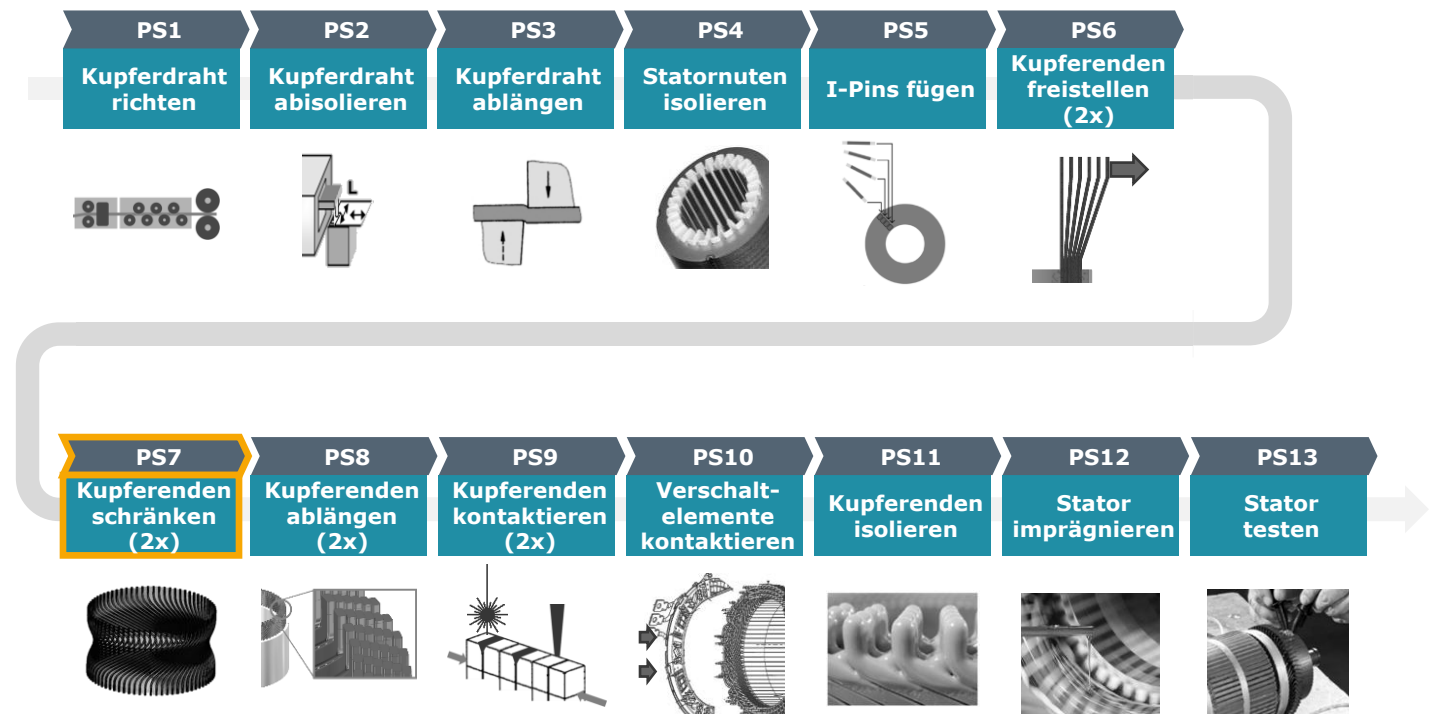
Geometrie eines I-Pins



Ausbau eines I-Pin-Stators



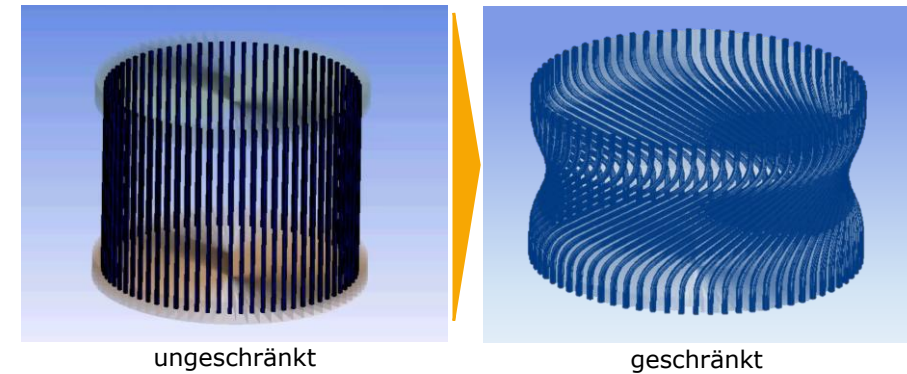
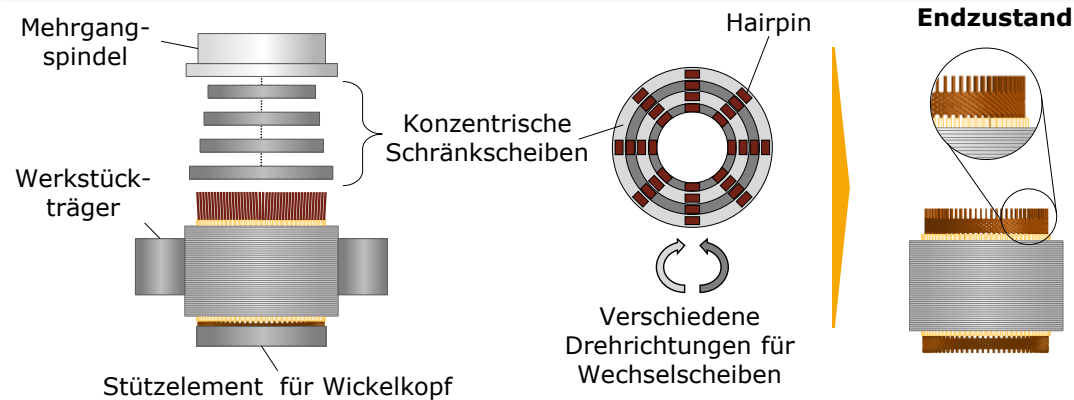
Generische Prozesskette der I-Pin-Technologie



Wickeltechnologien im Vergleich

Flachdrahttechnologie – I-Pin

PS7 – Kupferenden schränken



Prozessbeschreibung und -informationen

- Kupferenden werden lagenweise tangential umgeformt und in endgültige Form gebracht
- Überlagerung von rotatorischer und translatorischer Werkzeugbewegung
- Ziel ist, die zu kontaktierenden Kupferenden parallel zueinander auszurichten, was eine S-förmige Schränkegeometrie bedingt
- Gegebenenfalls werden Stützelemente am gegenüberliegenden Wickelkopf verwendet, um der axialen Hubkraft des Biegevorgangs entgegenzuwirken

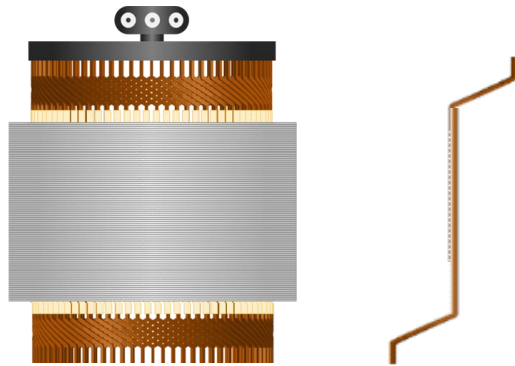
Zielsetzung und Qualitätsmerkmale

- Kreuzweise Anordnung der Hairpin-Enden am Boden des Stators gemäß dem Schaltplan
- Qualitätsmerkmale an den Prozess stellen hierbei folgende Eigenschaften dar:
 - Form- und Lagetoleranzen der Kupferenden
 - Keine Beschädigung der Leiterisolation
 - Keine Beschädigung der Nutisolation
 - Höhentoleranz

Wickeltechnologien im Vergleich

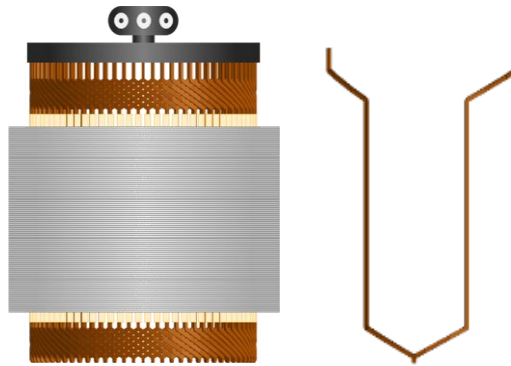
Flachdrahttechnologie – Übersicht

I-Pin



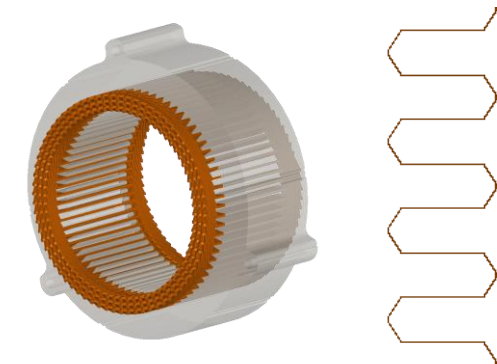
- Beidseitig geschränkt und verschweißte Wicklung (2x Lead-Site)
- + Aufgrund beidseitiger großer Oberfläche erhöhte Kühlmöglichkeit
- + Entfall kostenintensiver Biege- und Twist-Vorgänge
- + Hohe Technologiereife
- Beidseitig erhöhte Wickelkopfhöhe
- Hohe Anzahl an Schweißpunkten

U-Hairpin



- Einseitig geschränkt und verschweißte Wicklung (1x Lead-Site)
- Gegenüberliegende Wickelkopf mit End-turn/geschlossener Seite des Hairpins
- + Geringe Wickelkopfhöhe auf End-Turnseite
- + Ermöglicht komplexe Wickelschemata
- + Reduzierte Schweißpunktanzahl
- + Hohe Technologiereife
- Komplexe Biege- und Twistvorgänge

Kontinuierliche Hairpinwicklung

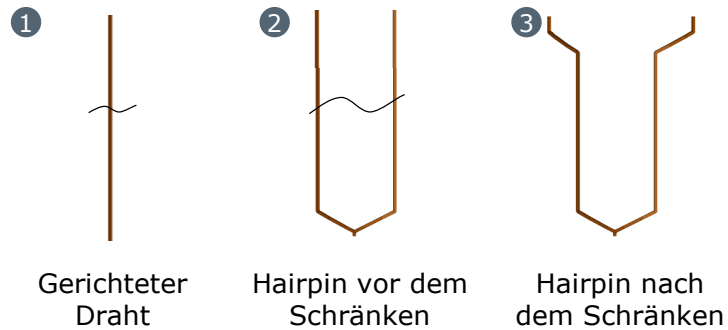


- Kont. Wicklung mit einseitig, teilweise verschweißter Wicklung (1x Lead-Site)
- Gegenüberliegende Wickelkopf mit End-turn/geschlossener Seite des Hairpins
- + Beidseitig geringe Wickelkopfhöhe
- + Deutliche Reduktion der Anzahl an Schweißpunkten
- Erhöhte Verluste durch Nutöffnungsdesign
- Komplexität der Biege-/ Montagevorgänge

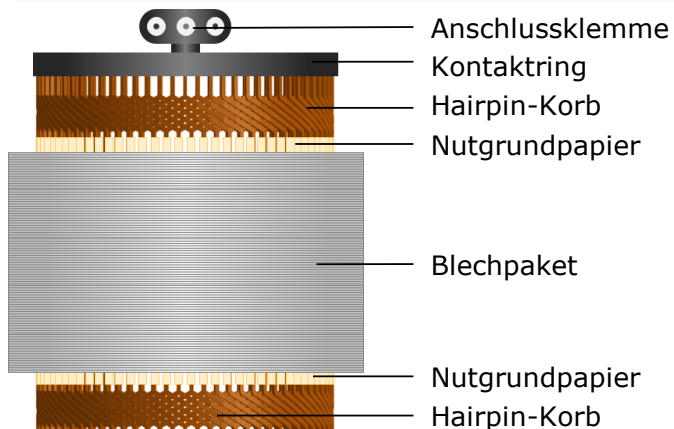
Wickeltechnologien im Vergleich

Flachdrahttechnologie – U-Hairpin

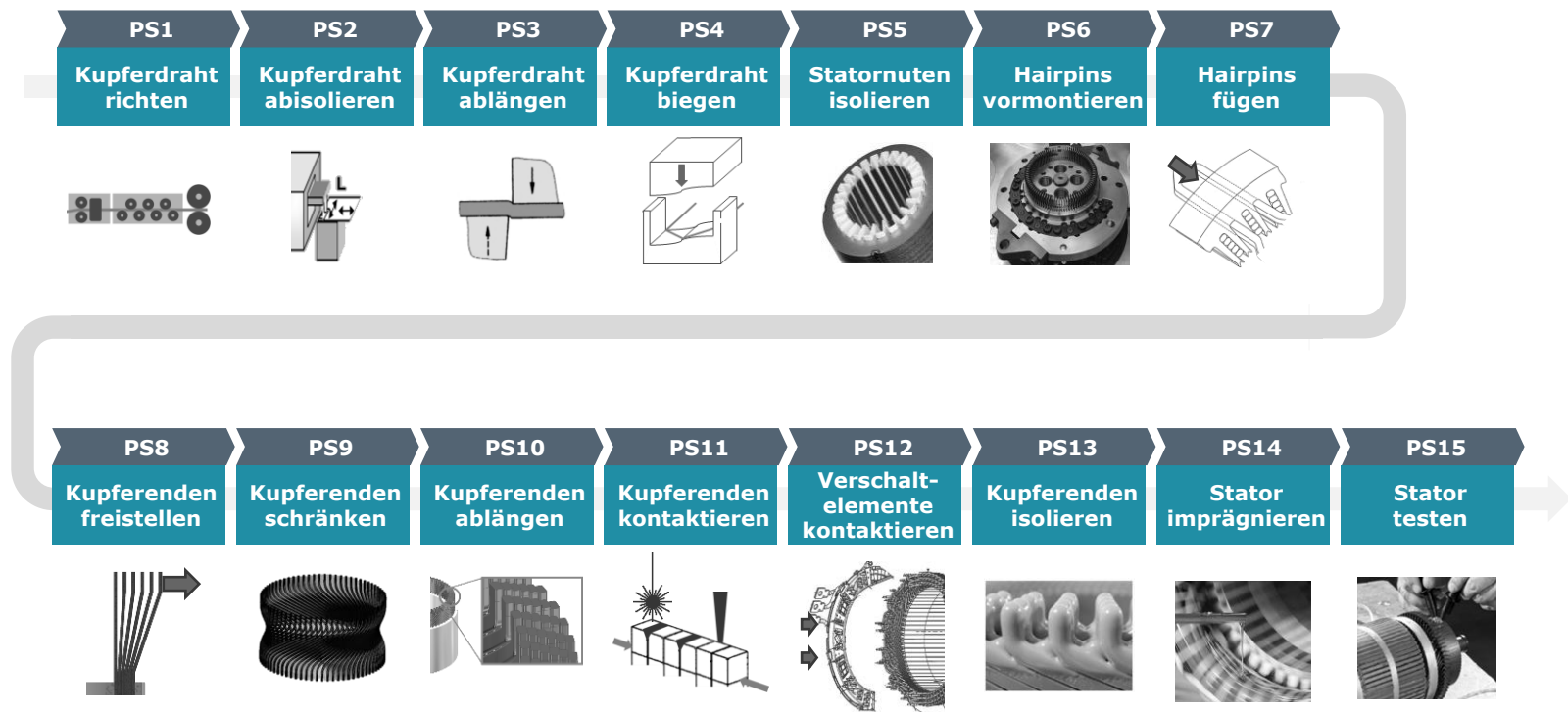
Geometrie eines U-Hairpins



Ausbau eines Hairpin-Stators



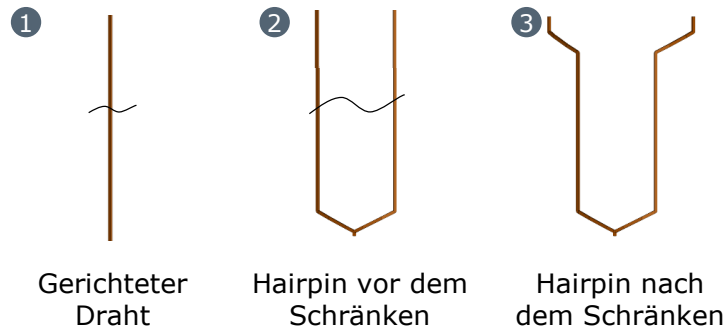
Generische Prozesskette der U-Hairpin-Technologie



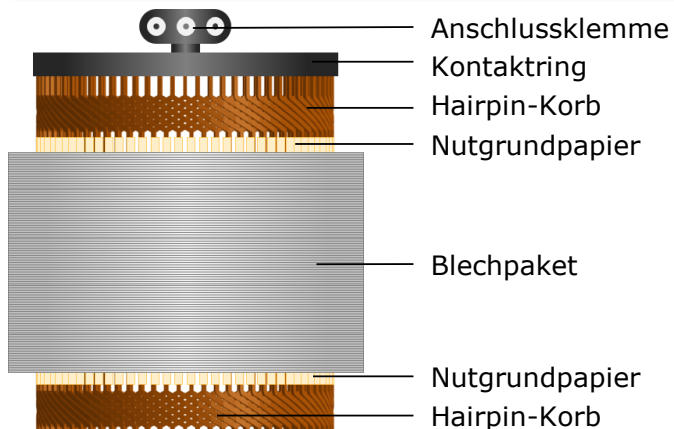
Wickeltechnologien im Vergleich

Flachdrahttechnologie – U-Hairpin

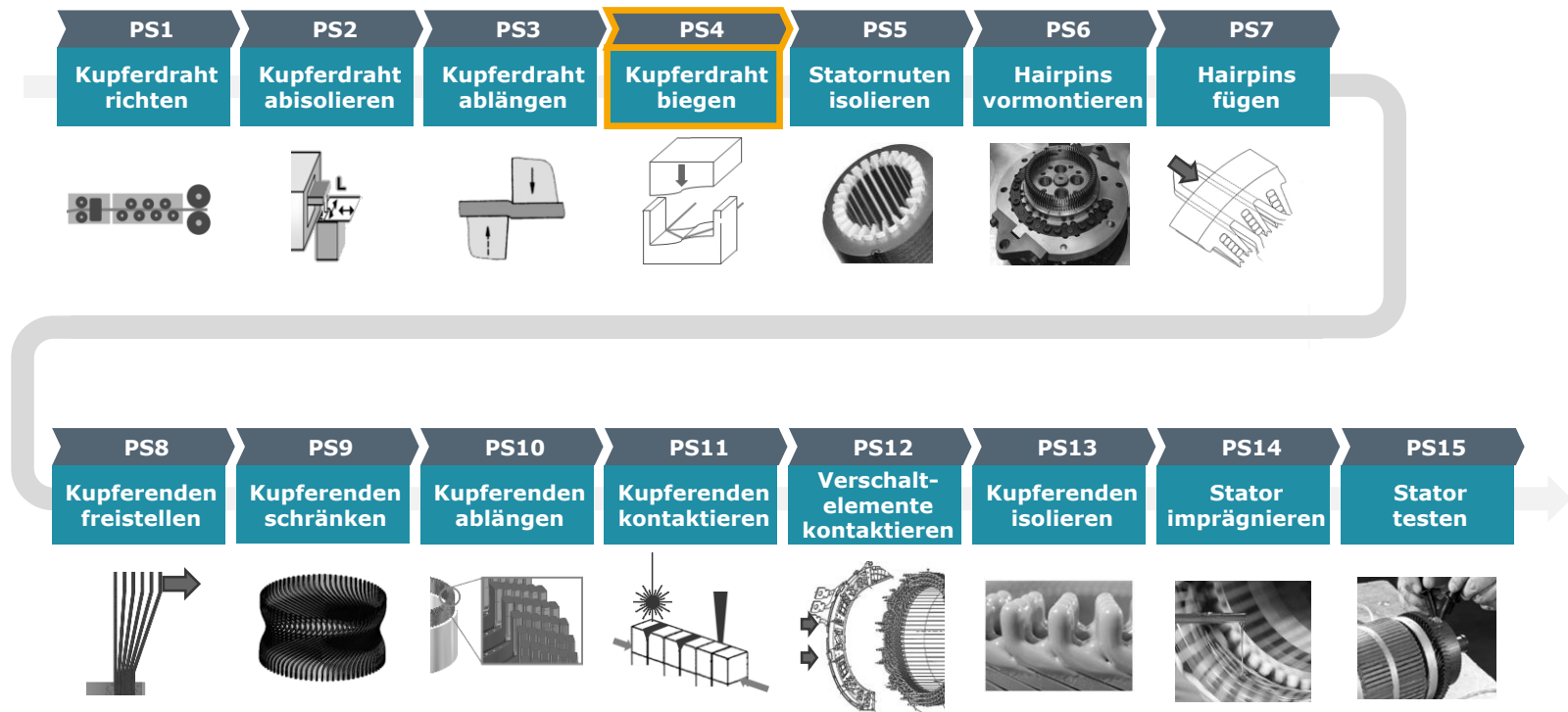
Geometrie eines U-Hairpins



Ausbau eines Hairpin-Stators



Generische Prozesskette der U-Hairpin-Technologie

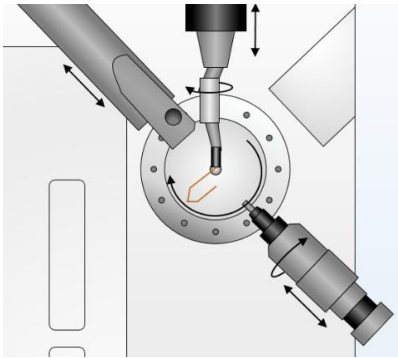


Wickeltechnologien im Vergleich

Flachdrahttechnologie – U-Hairpin

PS4 – Kupferdraht biegen

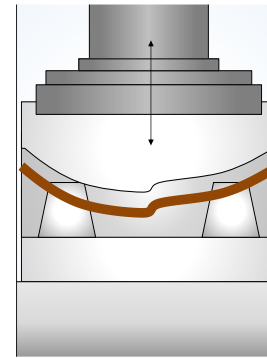
CNC-Biegen



Prozessbeschreibung und -informationen

- Unterscheidung zwischen dem 2D- und dem 3D-Biegen
- Die Kupferdrähte müssen dreidimensional gebogen werden, um im Stator verschiedene Lagen untereinander verbinden zu können
- Der gesamte Formgebungsprozess der Kupferdrähte kann dabei ein- oder mehrstufig erfolgen (integrierte bzw. spezialisierte Anlagen)
- Verfahrensalternativen mit Einfluss auf Qualität/ Variantenflexibilität
- Formtoleranzen sind entscheidend für Prozesssicherheit der weiteren Prozesse sowie für die Kompaktheit des Wickelkopfes
- Hohes Prozessentwicklungs- und Innovationspotenzial

Gesenkbiegen



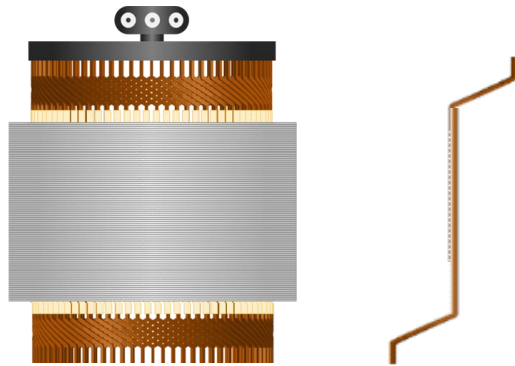
Zielsetzung und Qualitätsmerkmale

- Erzeugen einer U- und 3D-Form durch plastische Formänderung, so dass zwei Beine und eine Endwicklung (Endturn) entstehen
- Qualitätsmerkmale an den Prozess stellen hierbei folgende Eigenschaften dar:
 - Form-, Winkel- und Lagetoleranzen (Absolut-Position/ Verdrehung, Öffnungswinkel)
 - Keine Isolationsschäden oder Änderung der Isolationsdicke am Außenradius
 - Querschnittsänderung/ Eigenspannungszustand
 - Wiederholgenauigkeit (Ergebnisstreuung)

Wickeltechnologien im Vergleich

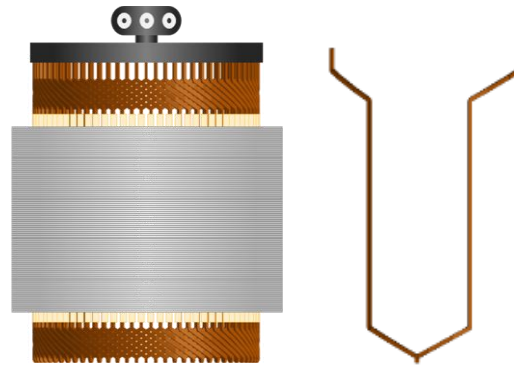
Flachdrahttechnologie – Übersicht

I-Pin



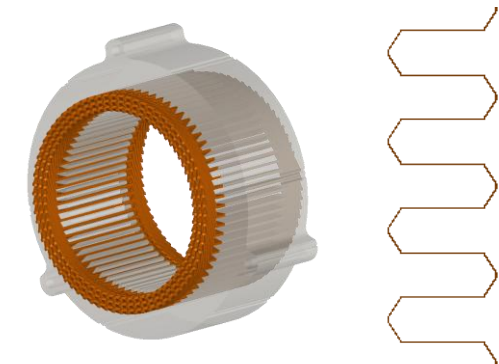
- Beidseitig geschränkt und verschweißte Wicklung (2x Lead-Site)
- + Aufgrund beidseitiger großer Oberfläche erhöhte Kühlmöglichkeit
- + Entfall kostenintensiver Biege- und Twist-Vorgänge
- + Hohe Technologiereife
- Beidseitig erhöhte Wickelkopfhöhe
- Hohe Anzahl an Schweißpunkten

U-Hairpin



- Einseitig geschränkt und verschweißte Wicklung (1x Lead-Site)
- Gegenüberliegende Wickelkopf mit End-turn/geschlossener Seite des Hairpins
- + Geringe Wickelkopfhöhe auf End-Turnseite
- + Ermöglicht komplexe Wickelschemata
- + Reduzierte Schweißpunktanzahl
- + Hohe Technologiereife
- Komplexe Biege- und Twistvorgänge

Kontinuierliche Hairpinwicklung

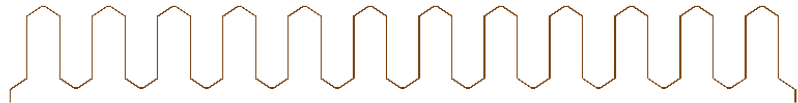


- Kont. Wicklung mit einseitig, teilweise verschweißter Wicklung (1x Lead-Site)
- Gegenüberliegende Wickelkopf mit End-turn/geschlossener Seite des Hairpins
- + Beidseitig geringe Wickelkopfhöhe
- + Deutliche Reduktion der Anzahl an Schweißpunkten
- Erhöhte Verluste durch Nutöffnungsdesign
- Komplexität der Biege-/ Montagevorgänge

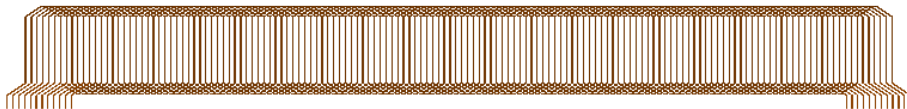
Wickeltechnologien im Vergleich

Flachdrahttechnologie – Kontinuierliche Hairpinwicklung

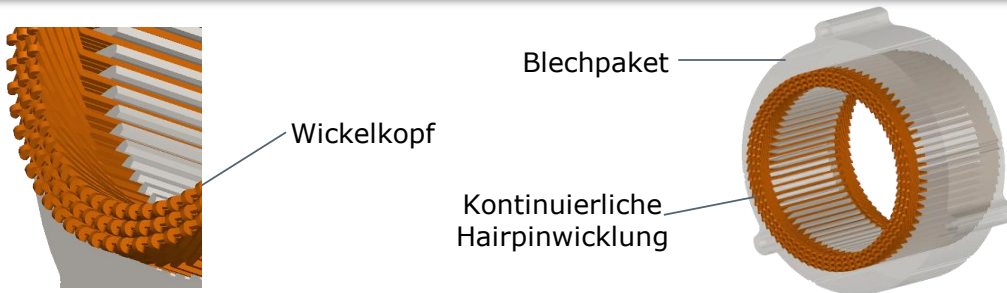
Darstellung eines Einzeldrahtes



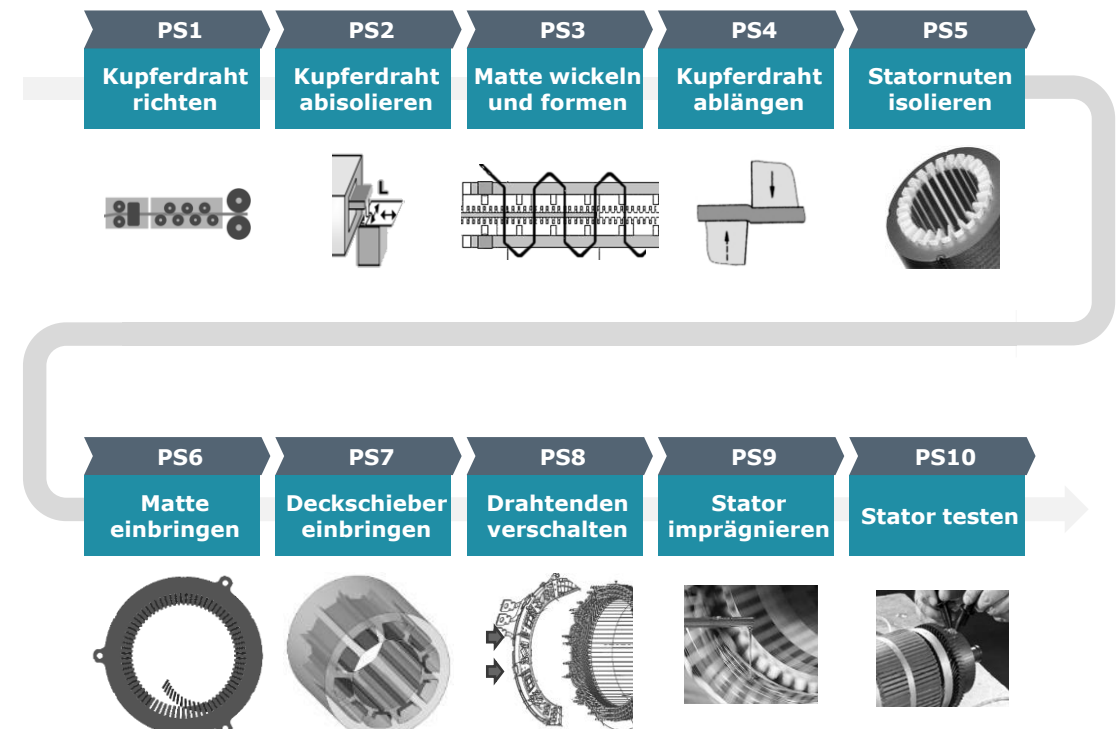
Darstellung einer gewickelten oder geschichteten Matte



Stator mit kontinuierlicher Hairpinwicklung



Generische Prozesskette der kont. Hairpinwicklung



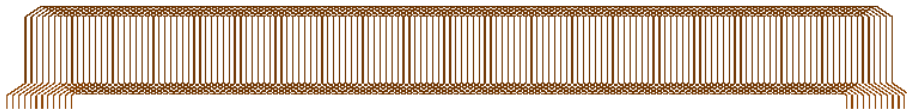
Wickeltechnologien im Vergleich

Flachdrahttechnologie – Kontinuierliche Hairpinwicklung

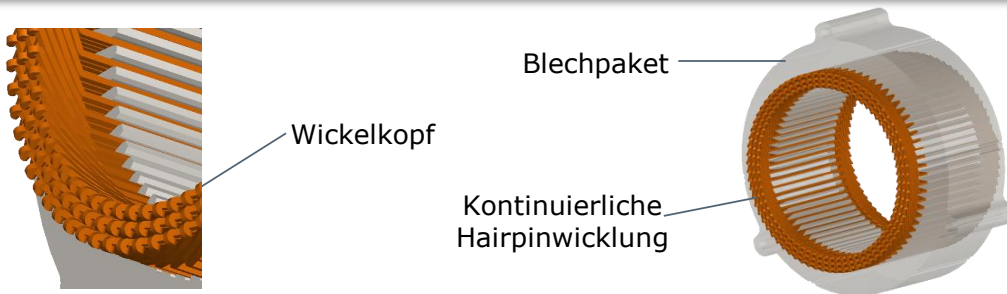
Darstellung eines Einzeldrahtes



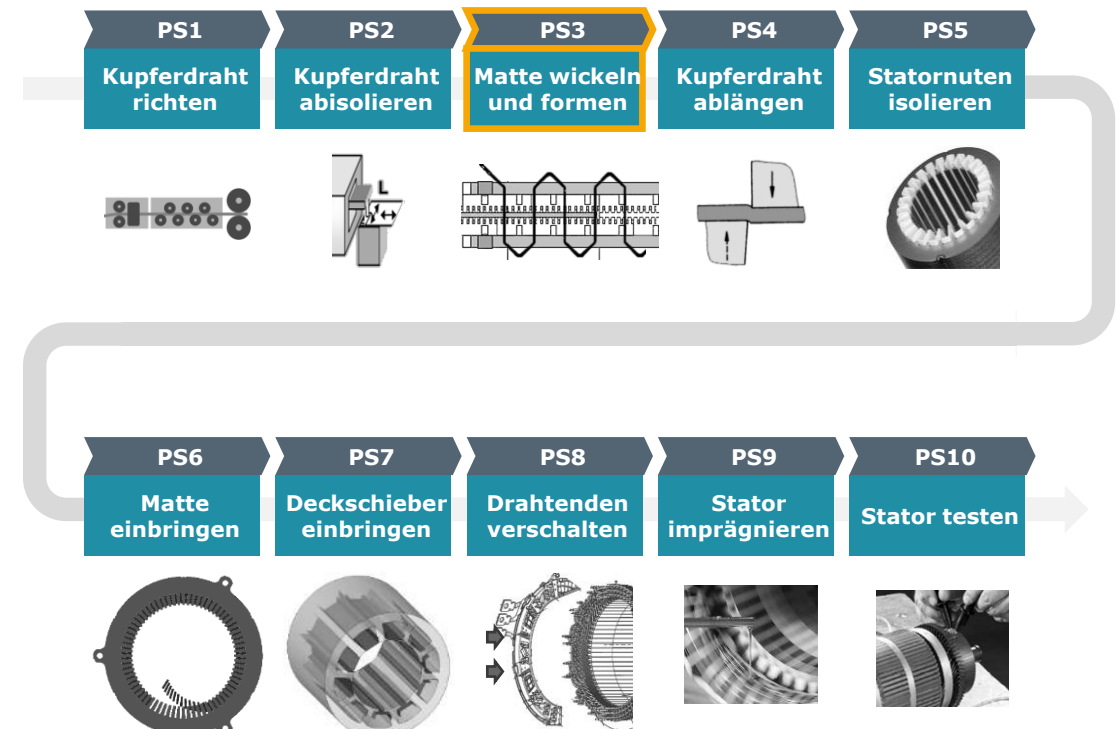
Darstellung einer gewickelten oder geschichteten Matte



Stator mit kontinuierlicher Hairpinwicklung



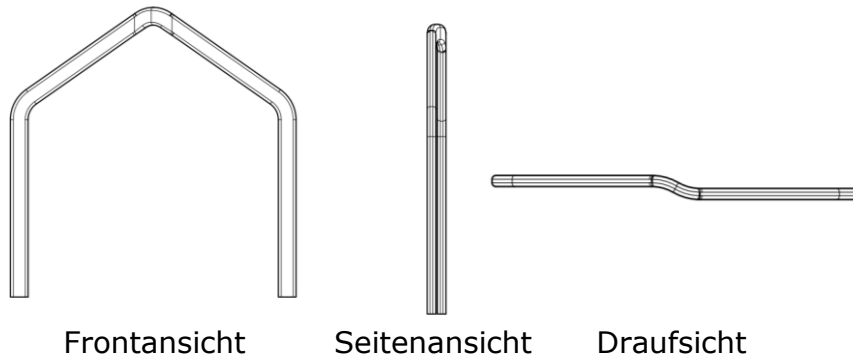
Generische Prozesskette der kont. Hairpinwicklung



Wickeltechnologien im Vergleich

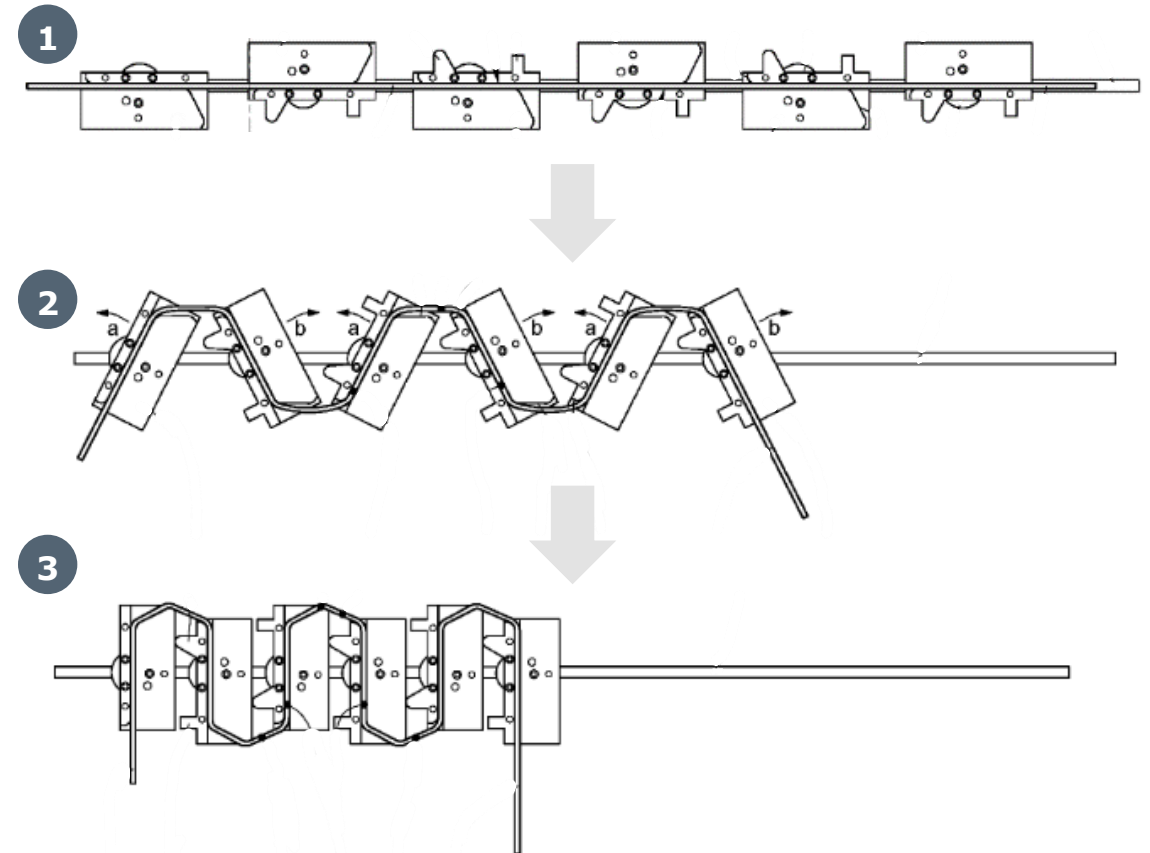
Flachdrahttechnologie – Kontinuierliche Hairpinwicklung

PS4 – Kupferdraht biegen - Flachwickeltechnik



Prozessbeschreibung und -informationen

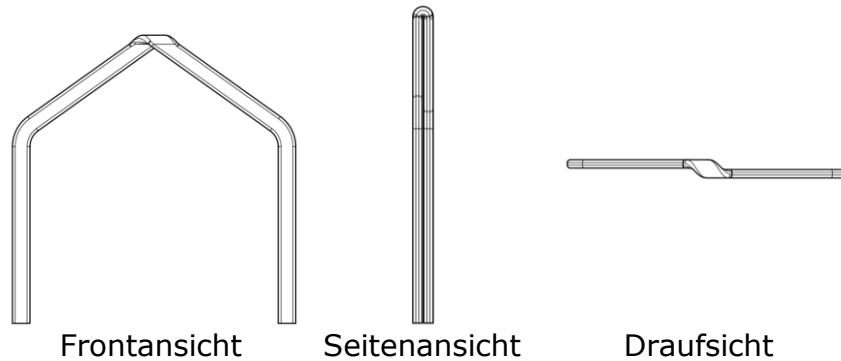
- Drahtindividuelles 2D-/ 3D-Biegen eines Mäandermusters & ggf. 3D-Formen der Kopfform
- Durch reine Biegebelastung geringere Prozesskräfte und Drahtbelastungen gegenüber der Wellenwicklung
- Assemblierung der Einzeldrähte zur Wicklungsmatte durch Stapeln oder Verweben
- Stapeln prozesstechnisch einfacher als Verweben, weist jedoch elektromagnetische Nachteile auf



Wickeltechnologien im Vergleich

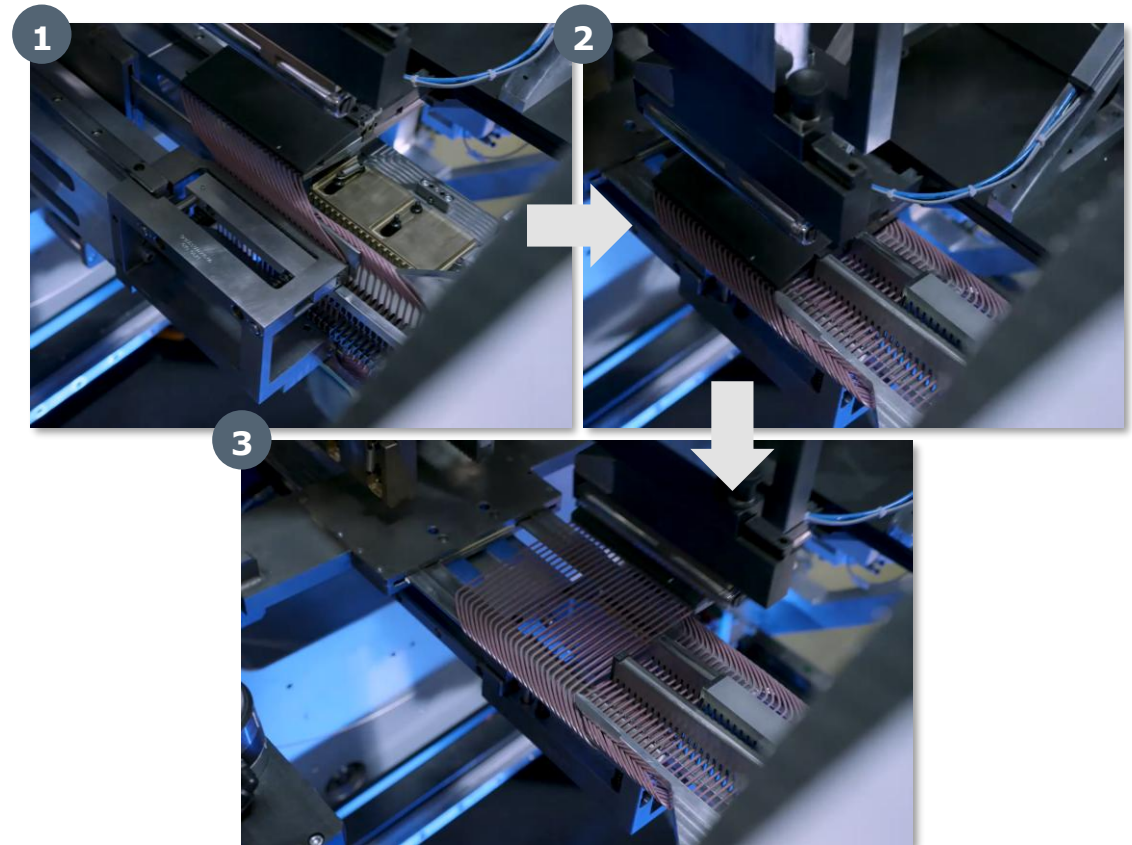
Flachdrahttechnologie – Kontinuierliche Hairpinwicklung

PS4 – Kupferdraht biegen - Schwertwickeltechnik



Prozessbeschreibung und -informationen

- Wicklung mehrerer paralleler Drähte um rotierendes Wickschwert mit Hilfe einer sich translatorisch bewegendes Drahtdüse
- Vergleichbar mit einem Linearwickelprozess mit translatorisch verfahrenender Drahtdüse
- Durch Überlagerung der Biege- und Torsionsbeanspruchung ergibt sich eine hohe Belastung für den Draht und die Isolationsschicht
- Kein Verweben oder Stapeln der Matte notwendig
- Anschließende Entformung und Verpressung der Drahtmatte





Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

SCALE-UP
E-DRIVE

Danke für ihre Aufmerksamkeit!

Hartha, 25. September 2025



M.Sc.
Tim Franitza



+49 (0) 1628 935127



t.franitza@pem.rwth-aachen.de



Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

SCALE-UP
E-DRIVE

Demontage-Seminar Elektromotoren in Hartha

Grundlagen Statorisolation

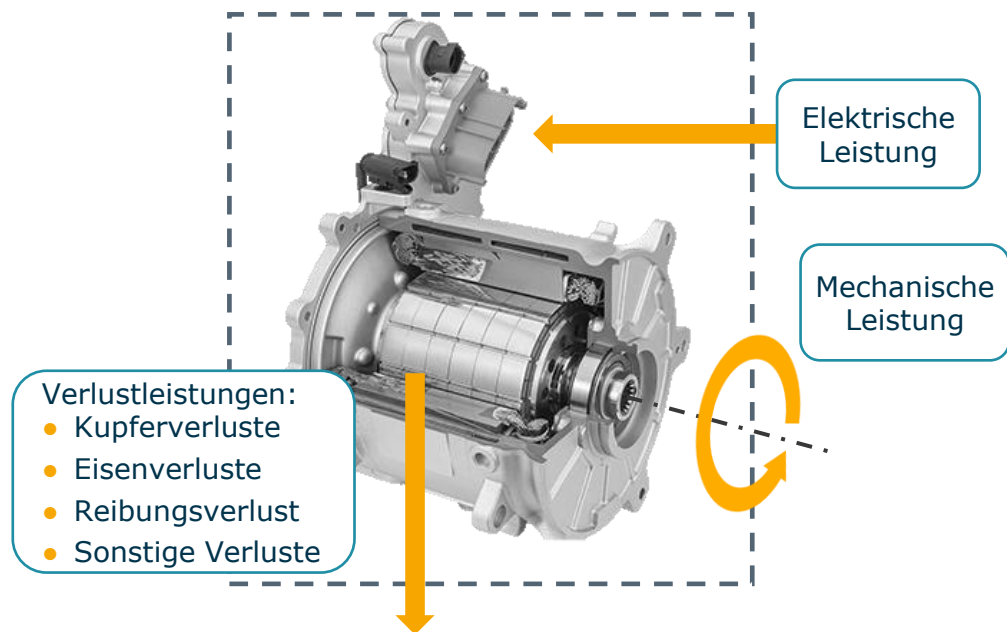
Hartha, 25. September 2025

Grundlagen Statorisolation

Motivation für Isolationssysteme

Leistungsbilanz eines Elektromotors

Elektrische Leistung wird in mechanische Leistung und Verlustleistung umgewandelt

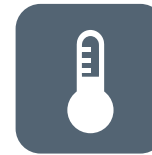


Aufgaben und Funktionen der Statorisolationssysteme



Trennung elektrischer Potentiale

Isolierung der Statorwicklung gegenüber dem geerdeten Statorblechpaket



Abführung von Verlustwärme

Effektive Abführung von Verlustwärme aus den Statorwicklungen, um eine Überhitzung bzw. Schädigung von Komponenten zu vermeiden



Fixierung und Schutz der Komponenten

Mechanische Fixierung der Wicklungen und sonstiger Komponenten sowie Schutz vor ambienten Belastungen

Die Statorisolationssysteme haben einen maßgeblichen Einfluss auf die Funktionsfähigkeit, Effizienz und Lebensdauer eines Elektromotors - die anforderungsgerechte Auslegung ist unerlässlich

Grundlagen Statorisolation

Statorisolationssysteme

Recap: Grundlegender Statoraufbau

Nutgrundisolation

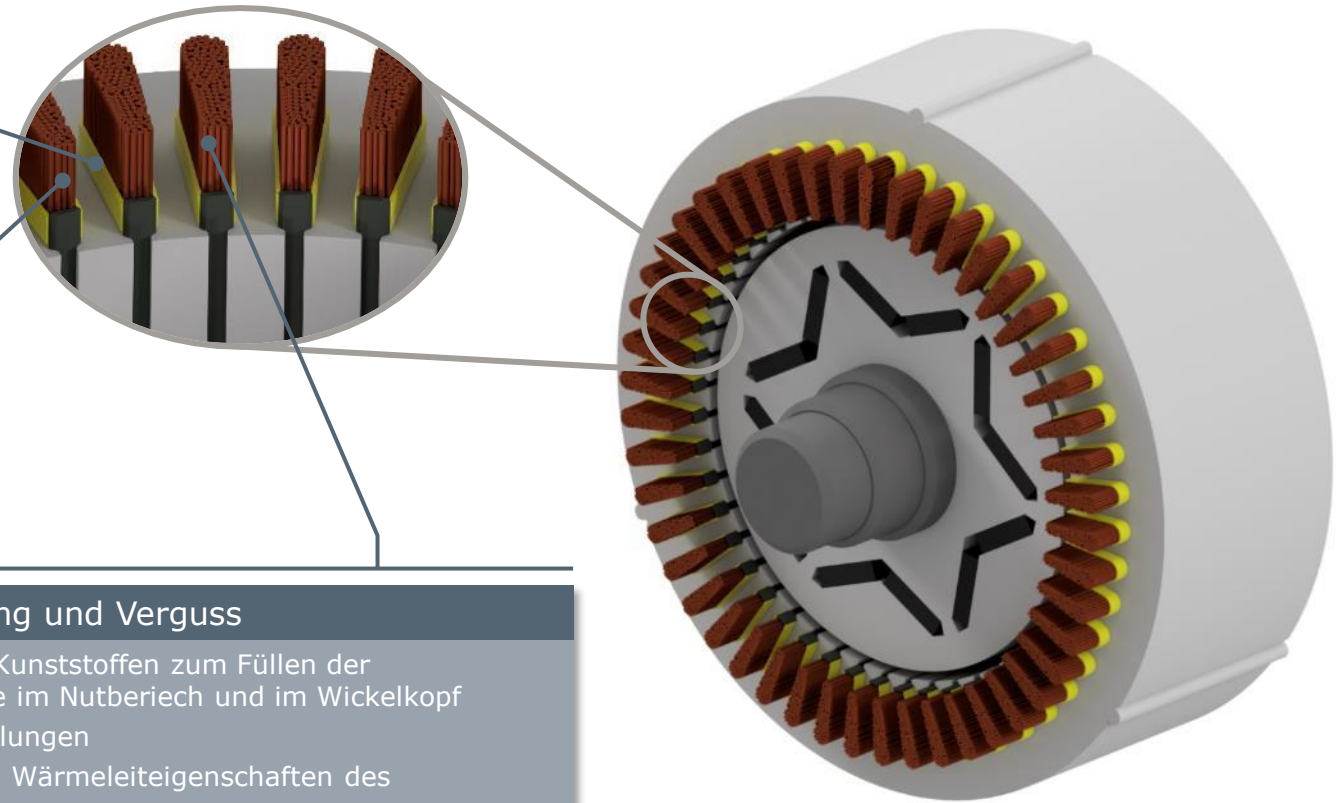
- Nutwand- und Nutgrundisolation mit stirnseitigem Deckschieber
- Trennung der isolierten Wickeldrähte vom Erdpotential des Statorblechpakets
- Phasen-Erde Isolation

Drahtisolation

- Trennung der einzelnen Kupferdrähte bzw. Leiterstäbe innerhalb eines Leiterbündels voneinander
- Leiter-Leiter Isolation

Imprägnierung und Verguss

- Sekundärisolation aus Harzen und Kunststoffen zum Füllen der Wicklungszwischen- und Hohlräume im Nutberiech und im Wickelkopf
 - Mechanische Fixierung der Wicklungen
 - Optimierung der Isolations- und Wärmeleiteigenschaften des Isolationssystems



Grundlagen Statorisolation

Anforderungen an elektrische Isolationsmaterialien in der Traktionsanwendung

Elektrisch



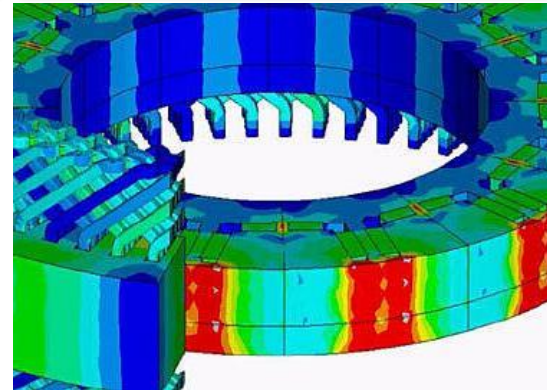
- Isolationsmaterialien sollten einen hohen spezifischen Widerstand sowie eine hohe Durchschlagsfestigkeit aufweisen
- Funktionen sind hierbei das Verhindern eines Stromflusses sowie das Trennen elektrischer Potentiale

Mechanisch



- Während der Motorherstellung kommt es bspw. durch die Formgebung oder durch Werkzeugkontakt zu mechanischen Beanspruchungen
- Im Betrieb wird die Isolation zudem bspw. durch Reibung oder Vibration belastet

Thermisch



- Je nach Betriebspunkt und Umgebungstemperatur kann die Motortemperatur zwischen -30°C und 180°C schwanken
- Diese Temperaturschwankungen und die damit einhergehenden Spannungen sind hauptverantwortlich für Alterungserscheinungen der Isolationsmaterialien

Ambiente



- Umgebungsfaktoren können je nach Intensität und Dauer der Exposition erhebliche Auswirkungen auf die Laufzeit haben
- Hierzu zählen bspw. Feuchtigkeit oder Temperatur

Die Isolationssysteme müssen den Schutz des Motors vor den internen und externen Belastungen sicherstellen und robust gegen diese ausgelegt sein, um ein frühzeitiges Ausfallen des Motors auszuschließen

Grundlagen Statorisolation

Statorisolationssysteme

Recap: Grundlegender Statoraufbau

Nutgrundisolation

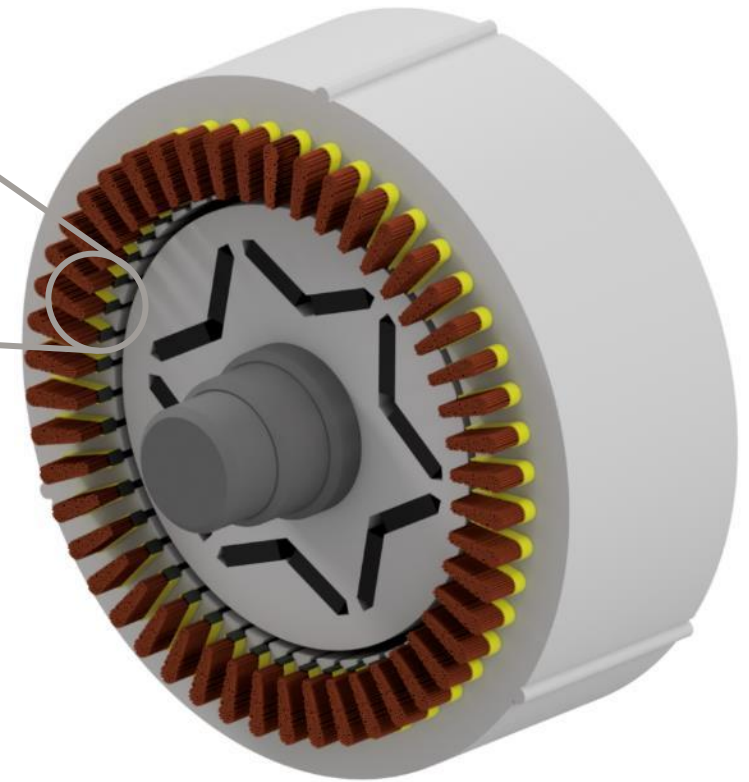
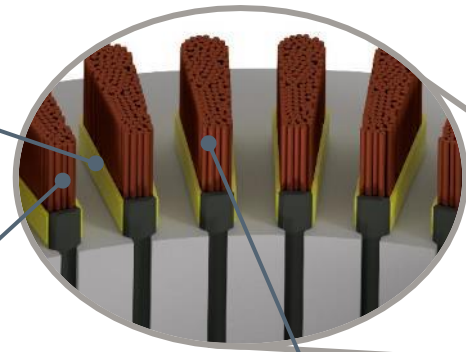
- Nutwand- und Nutgrundisolation mit stirnseitigem Deckschieber
- Trennung der isolierten Wickeldrähte vom Erdpotential des Statorblechpakets
- Phasen-Erde Isolation

Drahtisolation

- Trennung der einzelnen Kupferdrähte bzw. Leiterstäbe innerhalb eines Leiterbündels voneinander
- Leiter-Leiter Isolation

Imprägnierung und Verguss

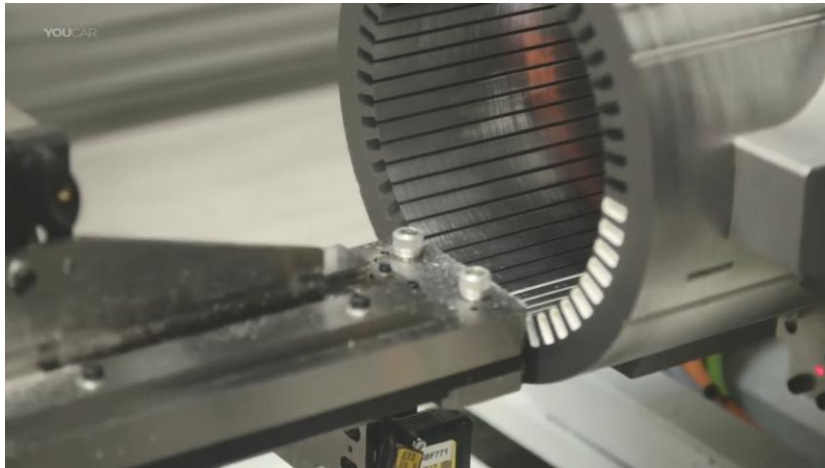
- Sekundärisolation aus Harzen und Kunststoffen zum Füllen der Wicklungszwischen- und Hohlräume im Nutbereich und im Wickelkopf
 - Mechanische Fixierung der Wicklungen
 - Optimierung der Isolations- und Wärmeleiteigenschaften des Isolationssystems



Grundlagen Statorisolation

Nutgrundisolation – Flächenisolation

Produktbeispiel



Eigenschaften

- Am weitesten verbreitetste Isolierstoffgruppe
- Gute Isoliereigenschaften bei gleichzeitig geringen Materialkosten
- Keine Einschränkungen für axiale Länge des Stators
- Lufteinschlüsse zwischen Nutisolation und Stator können minimiert, aber nicht vermieden werden
 - Verminderte Wärmeleitung
- Gefahr, dass Isolierstoff während der Auskleidung oder während des Wickelprozesses/ dem axialen Einschieben der Wicklung beschädigt wird
- Wandstärken zwischen 100 bis 650 μm

Prozesskette

1

Schneiden



- Zuschnitte aus Rollenmaterial, Bögen oder Tafeln
- Längs- oder Querschneiden

2

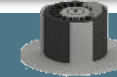
Formen



- Umbördeln
- Prägen
- Falzen
- Biegen
- Wickeln

3

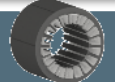
Umhüllen



- Auskleidung der zu isolierenden Oberfläche
- Einschießen oder Einlegen des Isolationsmaterials

4

Entfernen



- Entfernung von nicht erwünschten Überständen
- Kürzung
- Überlappendes Umlegen

Grundlagen Statorisolation

Nutgrundisolation – Flächenisolation

Diskrete Materialien	Flexible Laminate	Beschichtete Materialien
<ul style="list-style-type: none"> Isolationsstoffe werden entweder direkt für die Nutauskleidung verwendet oder mehrschichtig verarbeitet Selbes Material ein oder mehrlagig Insbesondere organische Stoffe wie Papiere aus Aramid sowie Kunststofffolien aus preiswertem Polyester oder leistungsstarkem Polyimid 	<ul style="list-style-type: none"> Verbinden (Kaschieren oder Kalandrieren) von zwei oder mehreren Schichten unterschiedlicher diskreter Flächenisolierstoffe Anpassung der Dicke, Stabilität und der Eigenschaften entsprechend der elektrischen und thermischen Anforderungen 	<ul style="list-style-type: none"> Die Beschichtung von Flächenisolationen mit Zusatzstoffen dient neben der Optimierung des Isoliervermögens auch der Verarbeitbarkeit beim Isolieren selbst Friktionsbeschichtungen bzw. Pressure Sensitive Adhesives erhöhen die Haftung zwischen Nutgrundisolation und Statorblechpaket

Isolationseigenschaften verschiedener Flächenisolierstoffe					
Produkt	Nomex 410	ELAN-Film HT180	NMN	NKN	Acuflex® GHG
Produktart	Aramidpapier	PET-Folie	PET-Laminat	PI-Laminat	PI-Glasfasergewebe
Nenndicke [µm]	180	190	210	200	180
Temperaturklasse	R:220 °C	H:180 °C	F:155 °C	R:220 °C	R:220 °C
Wärmeleitfähigkeit [W/m*K]	0,14	0,19	0,2	0,2	0,38
Spannungsdurchlagsfestigkeit [kV/mm]	15	75	25	40	77

Grundlagen Statorisolation

Statorisolationssysteme

Recap: Grundlegender Statoraufbau

Nutgrundisolation

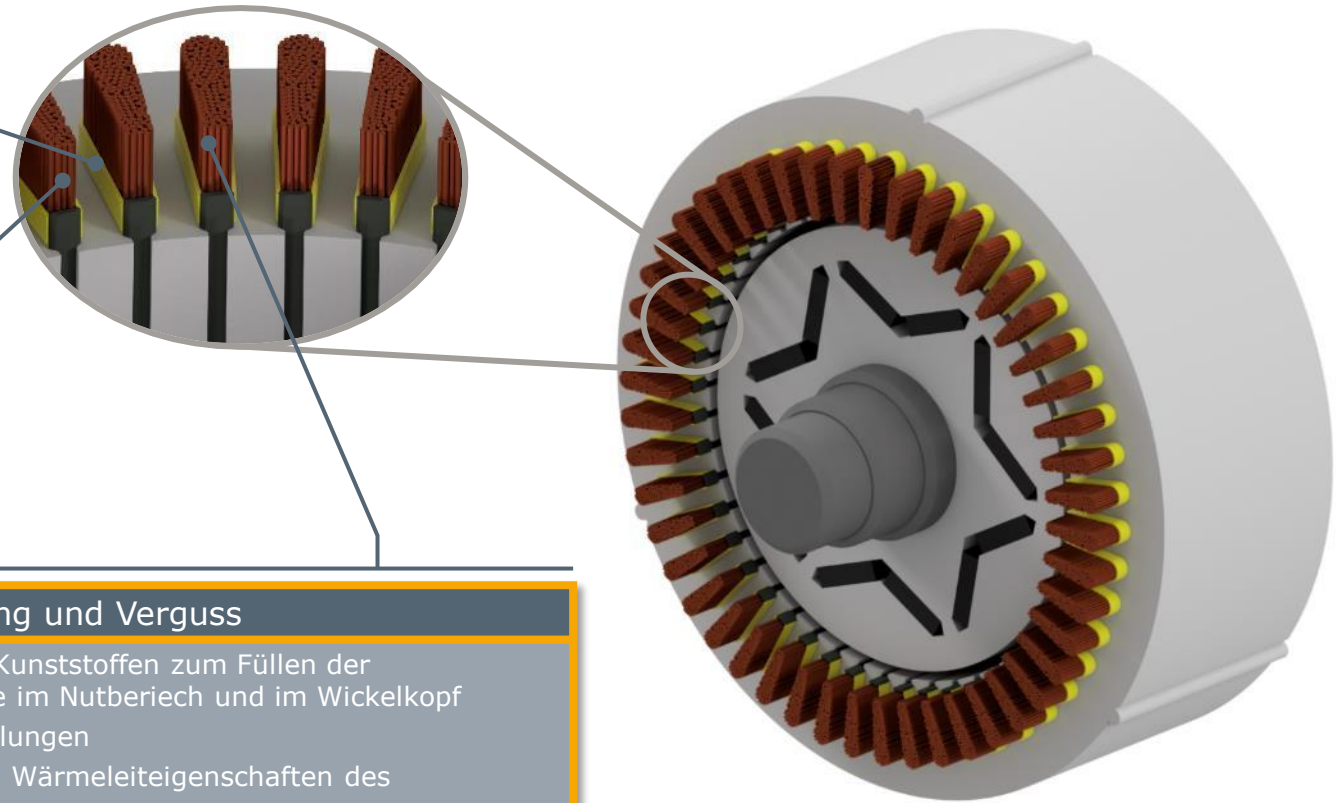
- Nutwand- und Nutgrundisolation mit stirnseitigem Deckschieber
- Trennung der isolierten Wickeldrähte vom Erdpotential des Statorblechpakets
- Phasen-Erde Isolation

Drahtisolation

- Trennung der einzelnen Kupferdrähte bzw. Leiterstäbe innerhalb eines Leiterbündels voneinander
- Leiter-Leiter Isolation

Imprägnierung und Verguss

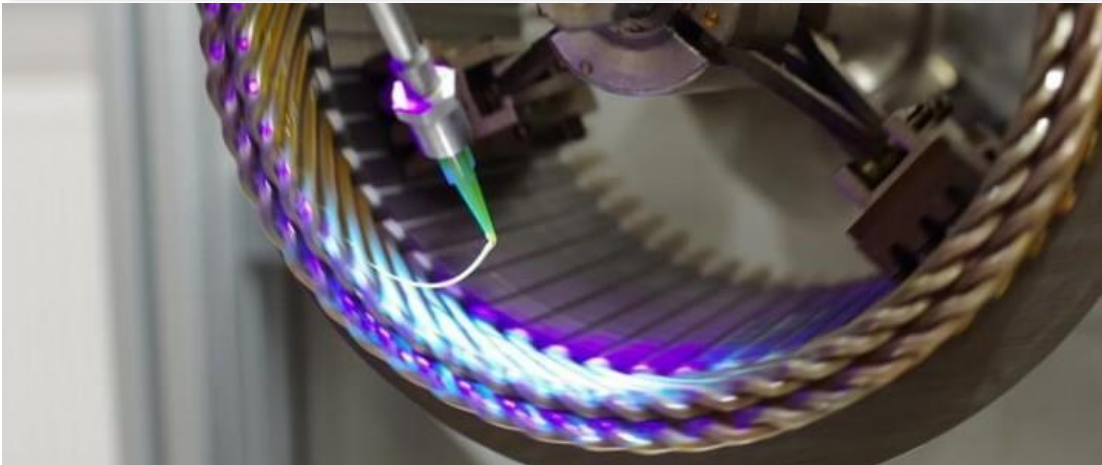
- Sekundärisolation aus Harzen und Kunststoffen zum Füllen der Wicklungszwischen- und Hohlräume im Nutbereich und im Wickelkopf
 - Mechanische Fixierung der Wicklungen
 - Optimierung der Isolations- und Wärmeleiteigenschaften des Isolationssystems



Grundlagen Statorisolation

Sekundärisolation

Imprägnieren



- Imprägnierung steigert Effizienz und erhöht die Lebensdauer
 - Optimierung der elektrischen Isolierung durch zusätzliches isolierendes Material im Stator
 - Bessere Wärmeleitung durch (teils) vollständiger Füllung des Stators und Schließung von Zwischenräumen (Luft)
 - Verstärkende Struktur fixiert die Wicklungen und Isolationselemente und schützt vor äußeren Belastungen schützt
- Eingesetzt bei Runddraht-, Hairpin- oder Wellenwicklungen

Kupferenden isolieren



- Gezieltes aufbringen von Isolationsmaterial im Bereich der Kupferenden nach dem Schweißvorgang
- Dient primär der elektrischen Leiter-Leiter Isolation und der Leiter-Blechpaket Isolation
- Durch gezieltes auftragen des Materials ergeben sich reduzierte Kosten
- Wird primär bei U-Hairpin sowie I-Pin eingesetzt

Grundlagen Statorisolation

Sekundärisolation

Imprägnieren



- Imprägnierung steigert Effizienz und erhöht die Lebensdauer
 - Optimierung der elektrischen Isolierung durch zusätzliches isolierendes Material im Stator
 - Bessere Wärmeleitung durch (teils) vollständiger Füllung des Stators und Schließung von Zwischenräumen (Luft)
 - Verstärkende Struktur fixiert die Wicklungen und Isolationselemente und schützt vor äußeren Belastungen
- Eingesetzt bei Runddraht-, Hairpin- oder Wellenwicklungen

Kupferenden isolieren

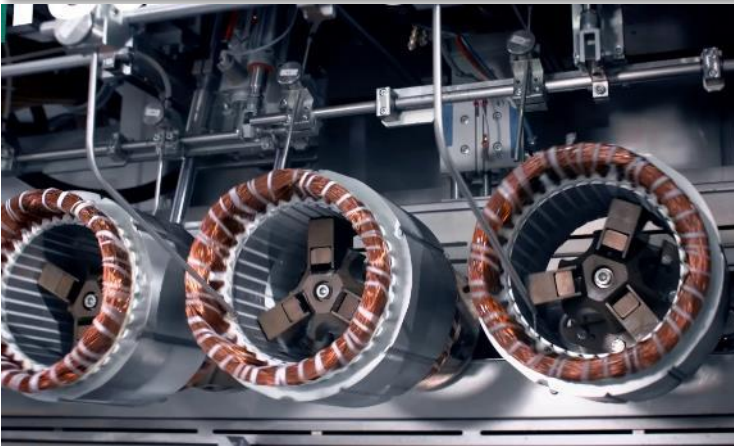


- Gezieltes aufbringen von Isolationsmaterial im Bereich der Kupferenden nach dem Schweißvorgang
- Dient primär der elektrischen Leiter-Leiter Isolation und der Leiter-Blechpaket Isolation
- Durch gezieltes auftragen des Materials ergeben sich reduzierte Kosten
- Wird primär bei U-Hairpin sowie I-Pin eingesetzt

Grundlagen Statorisolation

Imprägnierung

Träufeln



- Applikation des Materials an mit beheizten Düsen auf rotierenden Stator
 - Harz durchdringt Nut aufgrund des Kapillareffektes (Hoher Füllfaktor im Wickelkopf, geringer in Nut)
 - Aushärten des Harzes durch Heißluft
- + Geringe Nacharbeit notwendig
+ Hoher Harzfüllfaktor
+ Hohe Automatisierbarkeit

Tauchen



- Vollständiges/ teilweises Eintauchen des Stators in vorgeheiztes Harzbad
 - Aushärten des Harzes durch Widerstandserwärmung, Heißluft oder UV-Bestrahlung
- + Einfache Anlagentechnik
+ Hohe Prozessstabilität
- Nacharbeit durch auf Funktionsstellen

VI/VIP-Verfahren



- Einsatz von Über-/ Unterdruck eingesetzt, um Statoren mit Harz zu versiegeln
 - Stator wird in Druckkammer platziert, vorgewärmt und mit Harz durchflutet
 - Unterdruck in Kammer reduziert Luft und Feuchtigkeit im Stator
- + Hohe Füllfaktor (speziell am Nutgrund)
- Aufwendiges Verfahren und insbesondere für große Statoren geeignet

Grundlagen Statorisolation

Sekundärisolation

Imprägnieren



- Imprägnierung steigert Effizienz und erhöht die Lebensdauer
 - Optimierung der elektrischen Isolierung durch zusätzliches isolierendes Material im Stator
 - Bessere Wärmeleitung durch (teils) vollständiger Füllung des Stators und Schließung von Zwischenräumen (Luft)
 - Verstärkende Struktur fixiert die Wicklungen und Isolationselemente und schützt vor äußeren Belastungen
- Eingesetzt bei Runddraht-, Hairpin- oder Wellenwicklungen

Kupferenden isolieren

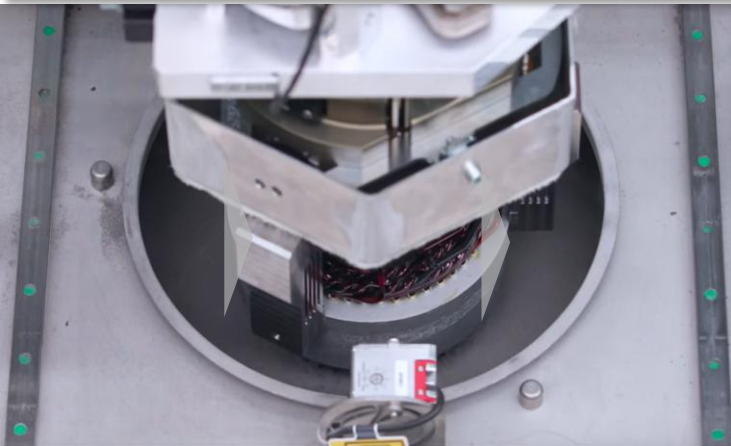


- Gezieltes aufbringen von Isolationsmaterial im Bereich der Kupferenden nach dem Schweißvorgang
- Dient primär der elektrischen Leiter-Leiter Isolation und der Leiter-Blechpaket Isolation
- Durch gezieltes auftragen des Materials ergeben sich reduzierte Kosten
- Wird primär bei U-Hairpin sowie I-Pin eingesetzt

Grundlagen Statorisolation

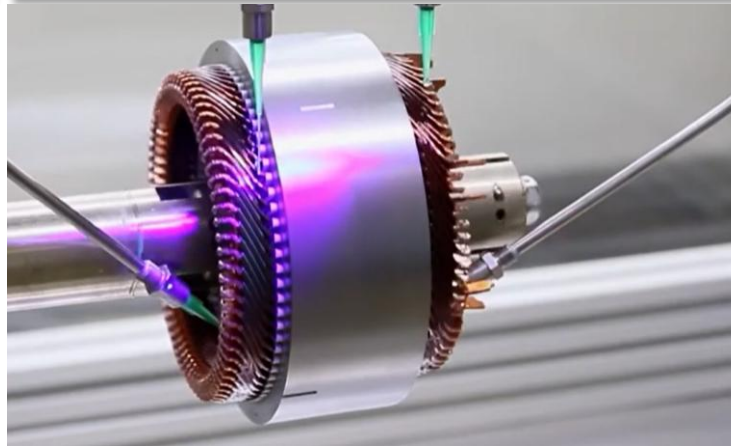
Kupferenden isolieren

Wirbelsintern



- Applikation von Isolationspulver durch Positionierung des erwärmten Stators im Sinterbecken
- Pulver wird durch Luftdruck über Öffnungen im Boden in das Becken geleitet und haftet an den erwärmten Drahtenden
- + Eignet sich für flexible Bauteilgeometrie
- Ggf. Nacharbeit erforderlich
- Exakte Material- und Prozessparameter erforderlich

Träufeln



- Applikation des Materials an mit beheizten Düsen auf rotierenden und vorgeheizten Stator
- Durch Kapillareffekt bildet sich homogene Isolationsschicht entlang der zu Kupferenden
- Aushärten des Harzes auf Heizstrecke
- + Präzise steuerbarer Prozess
- + Keine Harzrückstände an den Anlagen
- + Geringer Materialbedarf
- Komplexe Prozessparameter

Vollverguss



- Stator wird in spritzgussähnlichen Verfahren vollständig/ teil ummantelt
- Dichtkern drückt Vergussmaterial in Nuten und sorgt so für lunkerfreien Verguss
- + Gute Wärmeleitfähigkeit
- + Materialschonend und energiesparend durch Aushärtung bei niedrigen Temperaturen
- Geringe Flexibilität für unterschiedliche Statorgeometrien, da Werkzeug für Spritzgussanwendung notwendig

Grundlagen Statorisolation

Statorisolationssysteme

Recap: Grundlegender Statoraufbau

Nutgrundisolation

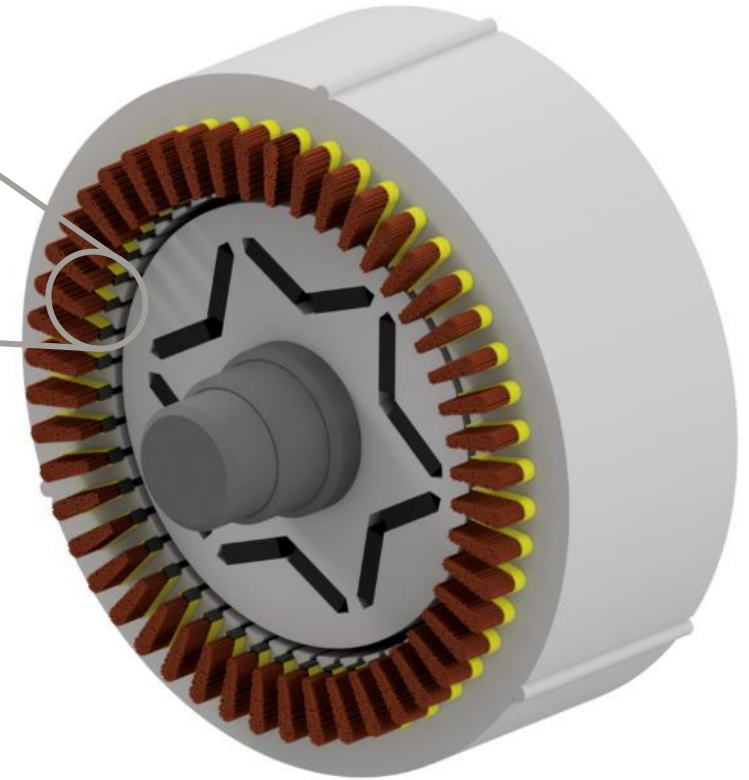
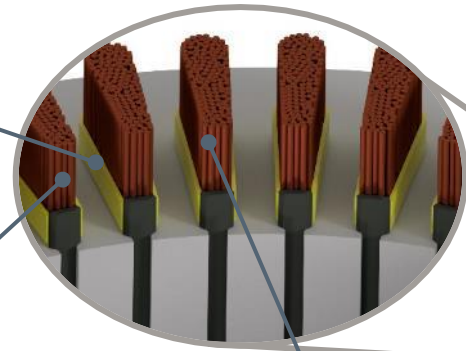
- Nutwand- und Nutgrundisolation mit stirnseitigem Deckschieber
- Trennung der isolierten Wickeldrähte vom Erdpotential des Statorblechpakets
- Phasen-Erde Isolation

Drahtisolation

- Trennung der einzelnen Kupferdrähte bzw. Leiterstäbe innerhalb eines Leiterbündels voneinander
- Leiter-Leiter Isolation

Imprägnierung und Verguss

- Sekundärisolation aus Harzen und Kunststoffen zum Füllen der Wicklungszwischen- und Hohlräume im Nutbereich und im Wickelkopf
 - Mechanische Fixierung der Wicklungen
 - Optimierung der Isolations- und Wärmeleiteigenschaften des Isolationssystems

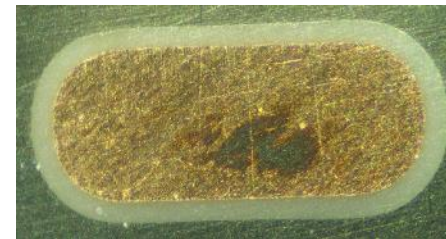


Drahtisolation

Beschreibung

- Trennung der einzelnen Kupferdrähte bzw. Leiterstäbe innerhalb eines Leiterbündels
- Ausführung der Isolation (Material, Schichtstärke, etc.) richtet sich nach Anwendungsanforderungen (Betriebsspannung, Betriebsstrom, Wickelschemata, .etc.)
- Maßgebliche Eigenschaften bilden unter anderem Durchschlagsfestigkeit, die Oberflächengüte und die Adhäsion der Isolation am Leiterkern
- Norm von Wickeldrähte / Isolation sind nach DIN EN 60851

Exemplarischer Aufbau



PEEK isolierter Flachdraht



PEEK-PAI isolierter Flachdraht

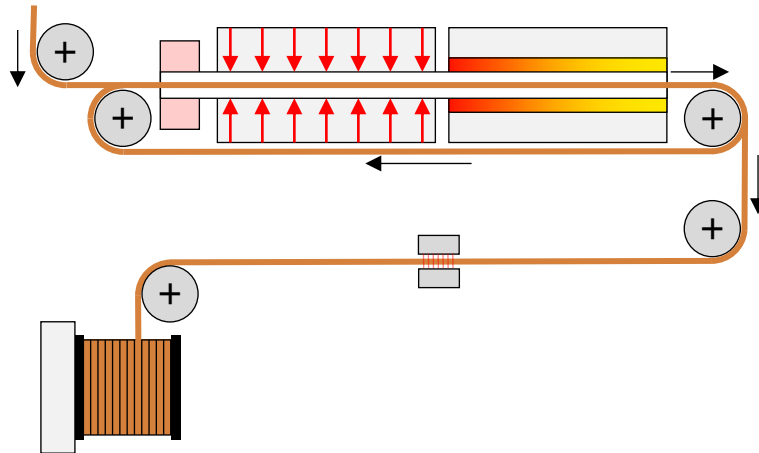
Isolationseigenschaften gängiger Isolationsstoffe

Produkt	Polyurethan	Polyether-etherketone	Polyimide	Polyamideimide	Polyesterimide
Haftkraft auf Metallen	Gut	Durchschnittlich	Durchschnittlich	Gut	Durchschnittlich
Gleiteigenschaften	Durchschnittlich	Gut	Gut	Durchschnittlich	Durchschnittlich
Durchschlagsfestigkeit [kV/mm]	24	19 – 73	56	25	23
Temperaturstabilität [°C]	180	250	240	260	180
Mechanische Festigkeit [MPa]	400	3500	2300	4500	2000

Grundlagen Statorisolation

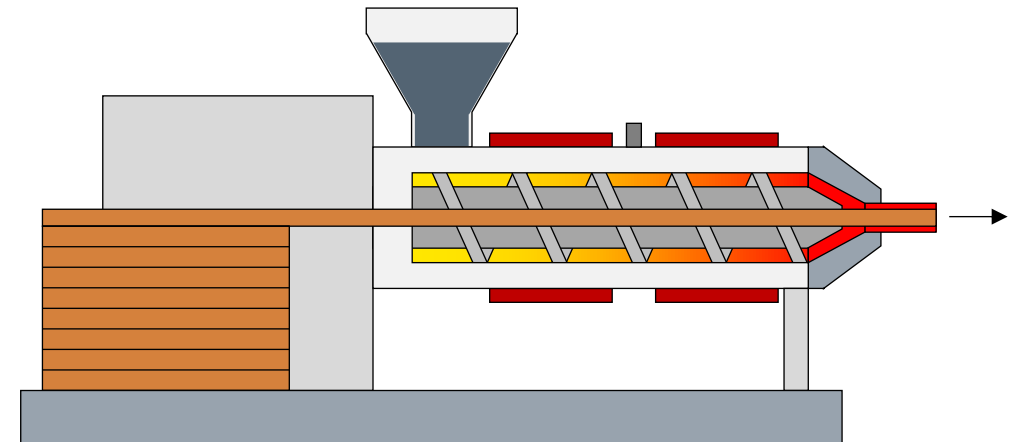
Drahtisolation

Lackieren



- Der Lack wird mittels Düsen (größere Lackmengen) oder Filz (kleinere Lackmengen) auf den Draht aufgetragen
- Anschließend durchläuft der Draht eine Heizstrecke, auf der die Lösungsmittel verdampft werden
- Je nach gewünschter Isolationsdicke kann der Draht den Schritt des Lackauftrags mehrmals durchlaufen
- Anschließend kühlt der Draht ab und der Lack härtet aus
- Vor dem Aufwickeln auf die Rolle wird der Draht hinsichtlich Schäden untersucht

Extrusionsprozess



- Granulat des jeweiligen Isolationsmaterials wird in einer Heizschnecke erhitzt und plastifiziert
- Die Schnecke fördert das Schmelzgut in Richtung Extruder
- Am Extruder wird der Kupferdraht, welcher die gesamte Extrusionsmaschine durchläuft, mit dem Kunststoff überzogen
- Anschließend wird die Extrusionsschicht abgekühlt und ausgehärtet
- Im Zuge der Extrusion besteht die Möglichkeit mehrere unterschiedliche Isolationsmaterialschichten übereinander zu extrudieren



Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

SCALE-UP
E-DRIVE

Danke für ihre Aufmerksamkeit!

Hartha, 25. September 2025



M.Sc.
Tim Franitza



+49 (0) 1628 935127



t.franitza@pem.rwth-aachen.de

Agenda

Demontage-Seminar Elektromotoren in Hartha

01

Begrüßung und Sicherheitsunterweisung
09:00 Uhr

04

Kaffeepause
11:00 Uhr

02

Integrierte Antriebssysteme im Überblick
09:30 Uhr

05

Produktionstechnologien im Vergleich
11:30 Uhr

03

Praxiseinblick „Demontage eines E-Antriebs“
10:15 Uhr

06

Praxiseinblick „Vergleich aktueller Motoren“
12:15 Uhr

07

Abschlussdiskussion, Feedback und Rundgang
13:30 Uhr

Agenda

Demontage-Seminar Elektromotoren in Hartha

01

Begrüßung und Sicherheitsunterweisung
09:00 Uhr

04

Kaffeepause
11:00 Uhr

02

Integrierte Antriebssysteme im Überblick
09:30 Uhr

05

Produktionstechnologien im Vergleich
11:30 Uhr

03

Praxiseinblick „Demontage eines E-Antriebs“
10:15 Uhr

06

Praxiseinblick „Vergleich aktueller Motoren“
12:15 Uhr

07

Abschlussdiskussion, Feedback und Rundgang
13:30 Uhr

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit



M.Sc., M.Sc.
David Drexler



+49 (0) 152 21 730752



d.drexler@pem.rwth-aachen.de



M.Sc.
Tim Franitza



+49 (0) 1628 935127



t.franitza@pem.rwth-aachen.de

SCALE-UP
E-DRIVE



Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages