



EXPERTENSEMINAR ELEKTROMOTORENPRODUKTION

Innovationen in der Produktarchitektur elektrischer Maschinen

Sebastian Kawollek, M.Sc.

Chair of Production Engineering of E-Mobility Components (PEM)

Aachen, 08. Oktober 2020

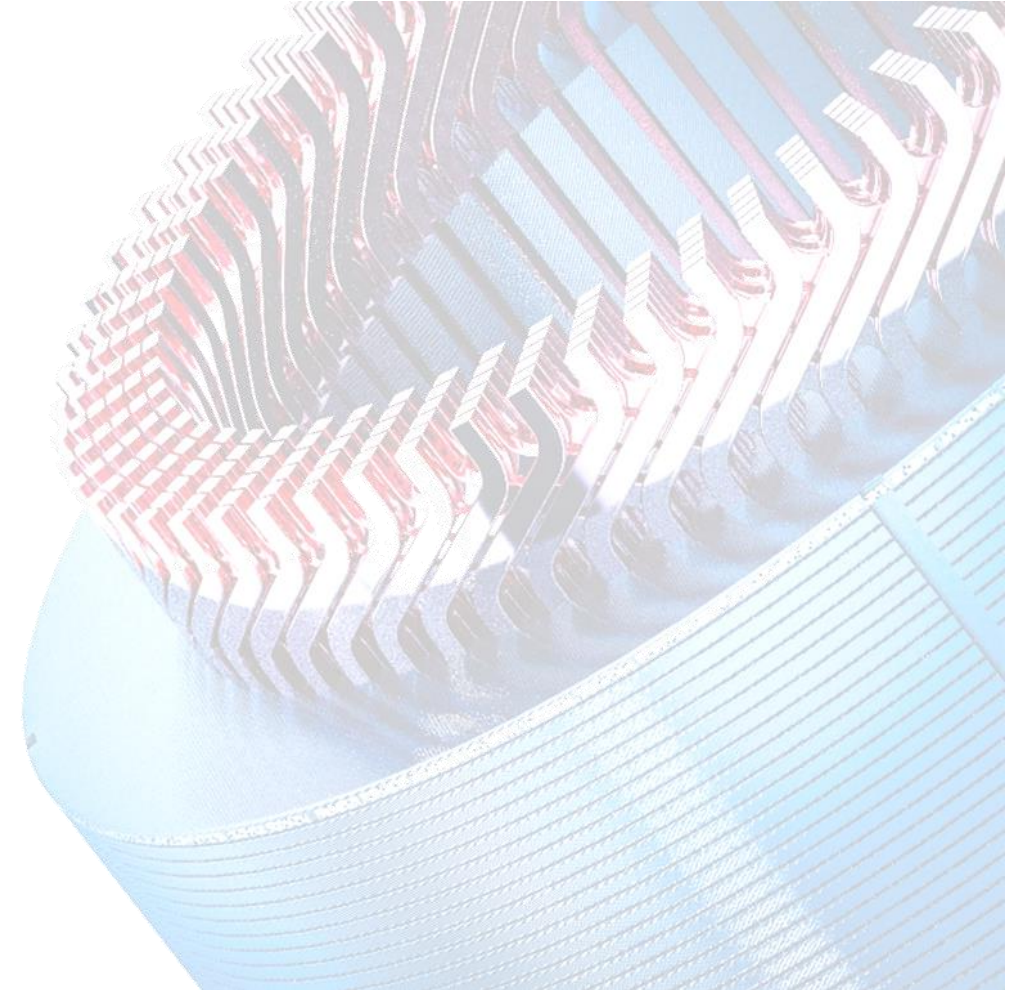


Dieser Vortrag soll...

... aktuelle Entwicklungen in der Elektromotorenproduktion aufzeigen

... disruptive Innovationen in der Produkt- und Prozesstechnologie einordnen

... einen Ausblick auf das heutige Seminar geben

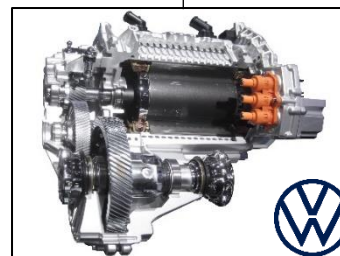
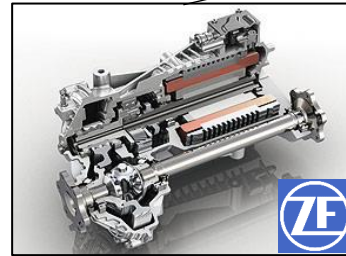
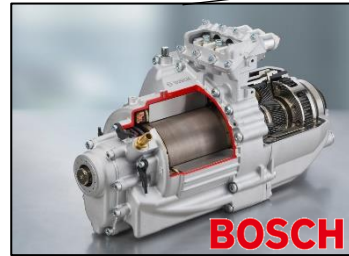


Innovationen als Chance zur Differenzierung

OEM und Tier haben in der Vergangenheit produkt- und prozessseitig Lösungen entwickelt

Automotive OEM:

„Der Elektromotor als Traktionsmotor kann endlich wieder Differenzierungsmerkmal im Fahrzeug sein.“



Produktseitige Differenzierung

- Innenläufer/ Radialflussmotor
- ASM/PSM/FSM
- Halbintegriertes Getriebe
- Externe Leistungselektronik

Prozessseitige Differenzierung

- Kleine/mittlere Stückzahlen
- Semi-automatisierte Anlagen
- Hohe Prüfaufwände
- Hohe Prozessindividualität

ASM – Asynchronmaschine
PSM – Permanentmagnet Synchronmaschine
FSM – Fremderregte Synchronmaschine

Mit dem im Automobilbau typischen Innovationsbestreben zeichnen sich für zukünftige Generationen von Elektromotoren neue Chancen zur Differenzierung auf Produkt- und Prozessebene ab.

Quelle (Bilder): : <http://www.manager-magazin.de>, <https://chargedevs.com>, <http://www.atzonline.com>, <https://www.automobil-produktion.de>, <https://www.schaeffler.de>, <http://insideevs.com>

Historie der Elektromotorenproduktion Von manuellen Aufgaben über semi- und vollautomatisierte Produktionssysteme zur varianten- und stückzahlflexiblen Produktion

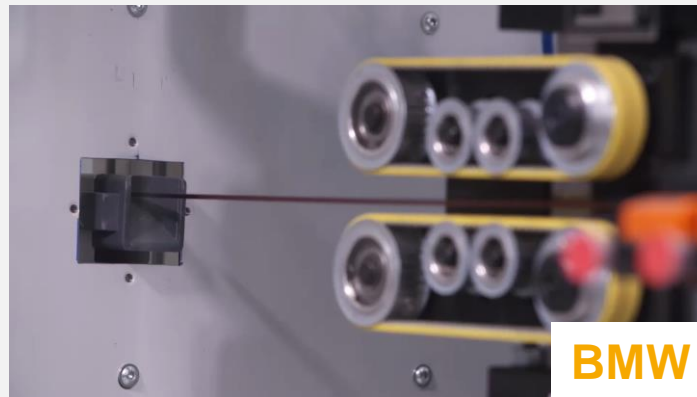
Gestern

- **Fokus: Manuelle Tätigkeiten und semi-automatisierte Produktionssysteme**
- Vollautomatisierte Produktionssysteme bestanden vorwiegend für Elektromotoren für stationäre Anwendungen und Nebenaggregate
- **Beispiel:** Continental (2011)



Heute

- **Fokus: Vollautomatisierte Produktionssysteme**
- Zuliefererunternehmen und Endhersteller sind derzeit dabei, vollautomatisierte Produktionssysteme für Elektromotoren im Traktionsbereich zu etablieren
- **Beispiel:** BMW (2020)



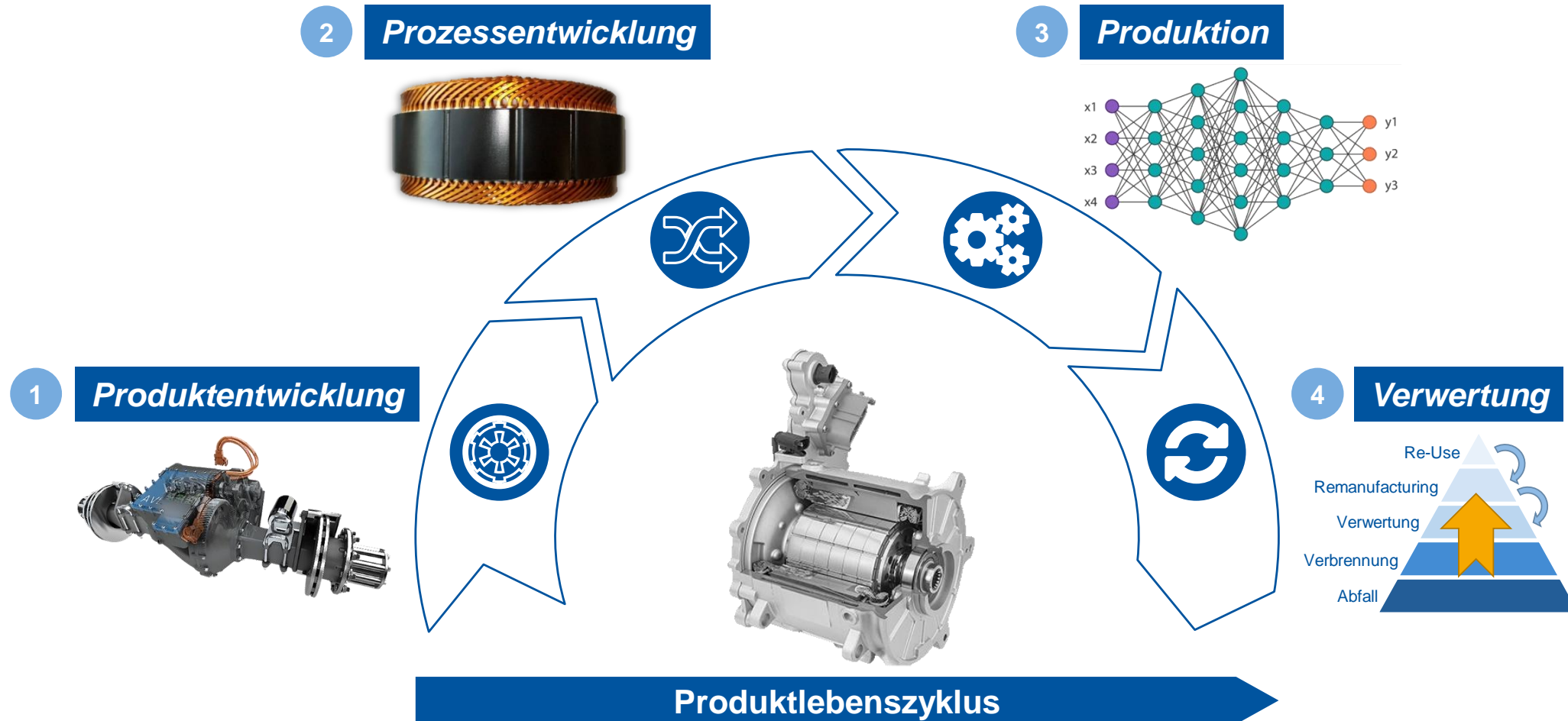
Morgen

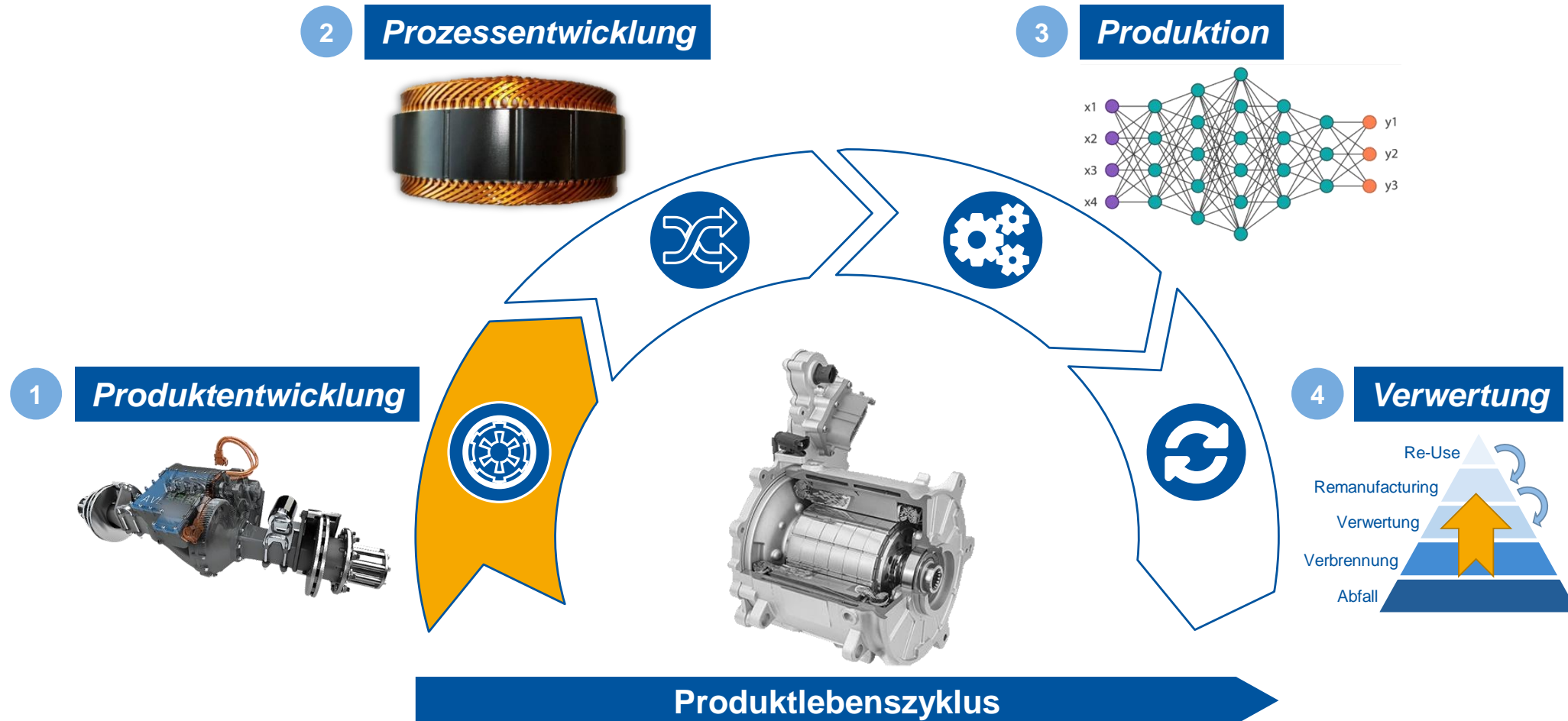
- **Fokus: Varianten- und stückzahlflexible Produktionssysteme**
- In Zukunft werden sich Zuliefererunternehmen und Endhersteller zusätzlich auf die Erhöhung der Varianten- und Stückzahlflexibilität konzentrieren
- **Aktuelle und geplante Forschungsprojekte PEM:**



In den letzten Jahren bis heute lag der Fokus in der Elektromotorenproduktion auf vollautomatisierten Produktionssystemen. In den kommenden Jahren wird ein zusätzlicher Fokus auf der Varianten- und Stückzahlflexibilität liegen.

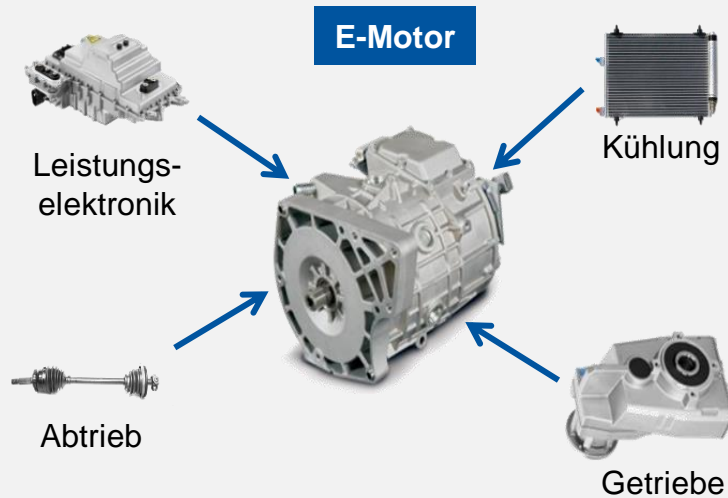
Quelle: Continental 2011; BMW 2020





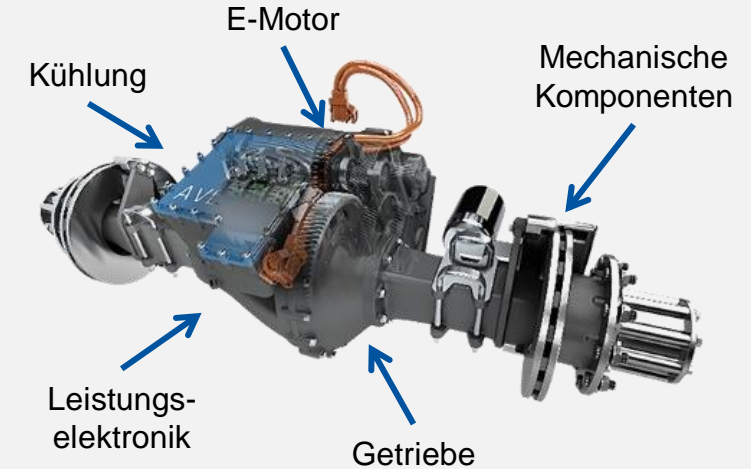


System aus Einzelkomponenten



- Hohe Variantenvielfalt
- Risiko der Inkompatibilität
- Hoher Platzbedarf
- Verteilte Wertschöpfungskette

Integrierte Achse



- Vollständige Systemintegration
- Vereinfachte Endmontage (Reduzierung der einzelnen Bauteile)
- Wertschöpfungskettenverschiebung
- Entwicklungsschwerpunkte in der funktionalen Sicherheit und Auslegung von Differentialen

Aktuelle Trends im Bereich der Nutzfahrzeuge zielen darauf ab, alle Teilfunktionen in einer einzigen Komponente zu integrieren. Die Herausforderungen ergeben sich dabei aus den Bereichen Informatik, Elektronik, Mechanik und Thermik.

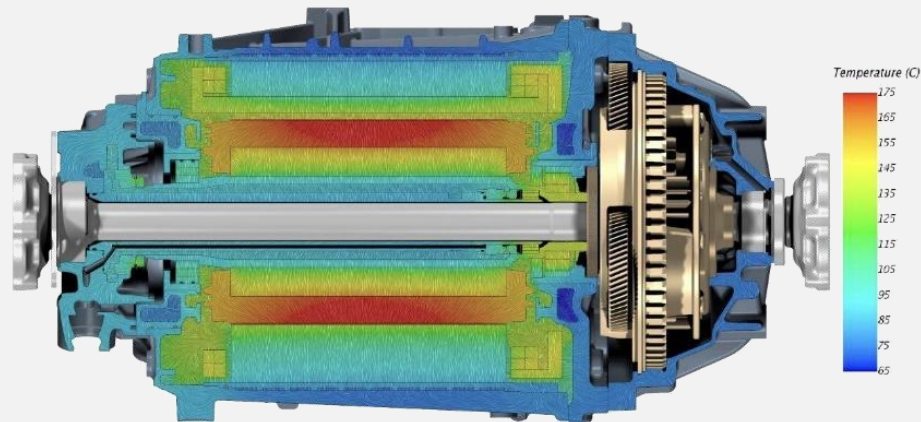
Innovation im Bereich Produktentwicklung

Neuartige Kühlkonzepte zur Effizienzsteigerung

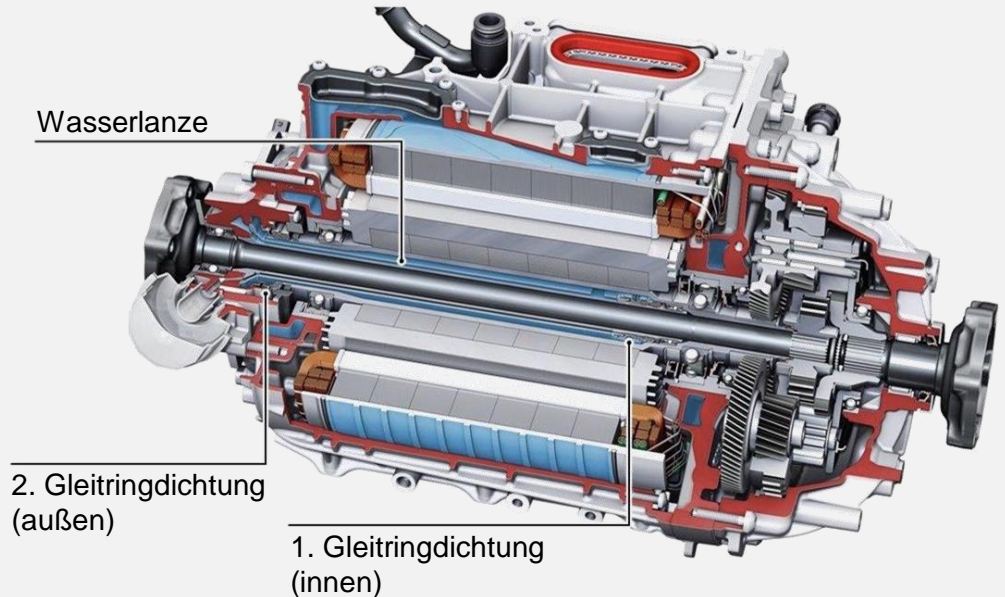


Hintergründe

- Der Trend zu Anwendungen mit hohen Drehzahlen (> 20.000 U/min) führt zur Notwendigkeit aktiver Rotorkühlkonzepte mit flüssigen Kühlmedien
- Derzeit werden Kühlmedien wie Wasser, Öl, andere Fluide (wie bspw. Glykol) oder Kombinationen aus diesen eingesetzt



Exemplarisches Kühlkonzept

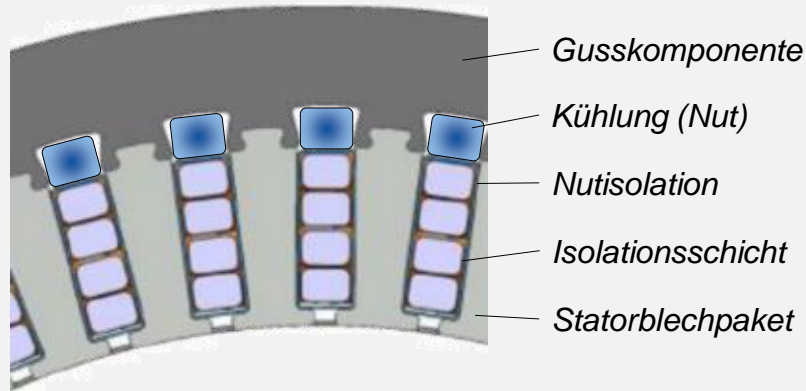


- Der Einsatz einer Wasserlanze (Hohlwelle) ermöglicht eine Rotorinnenkühlung direkt am Ort der Wärmeentstehung und damit eine deutliche Erhöhung der Motoreffizienz

Der limitierende Faktor für Hochdrehzahlmotoren ist häufig die starke Wärmeentwicklung während des Betriebs. Um das Leistungsgewicht dennoch zu erhöhen werden in Zukunft neue Kühlkonzepte erforderlich.



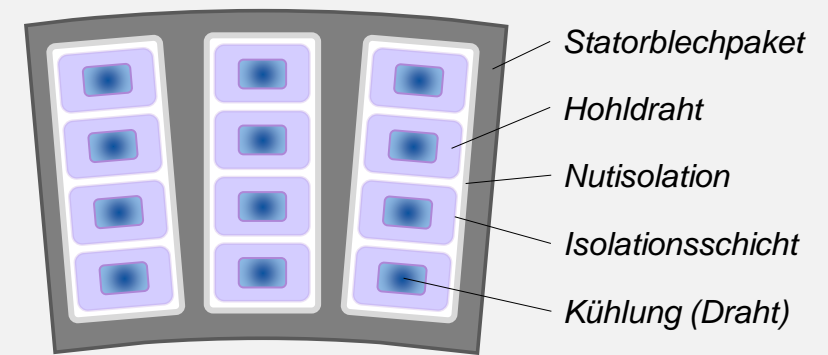
Kühlkonzept 1: Innere Nutkühlung



- Bei der inneren Nutkühlung wird die entstehende Wärme durch separate Kühlkanäle abgeführt
- Die Kühlkanäle befinden sich am äußeren Umfang des Statorblechpakets in einer extern angebrachten Gusskomponente



Kühlkonzept 2: Rechteckige Hohldrähte

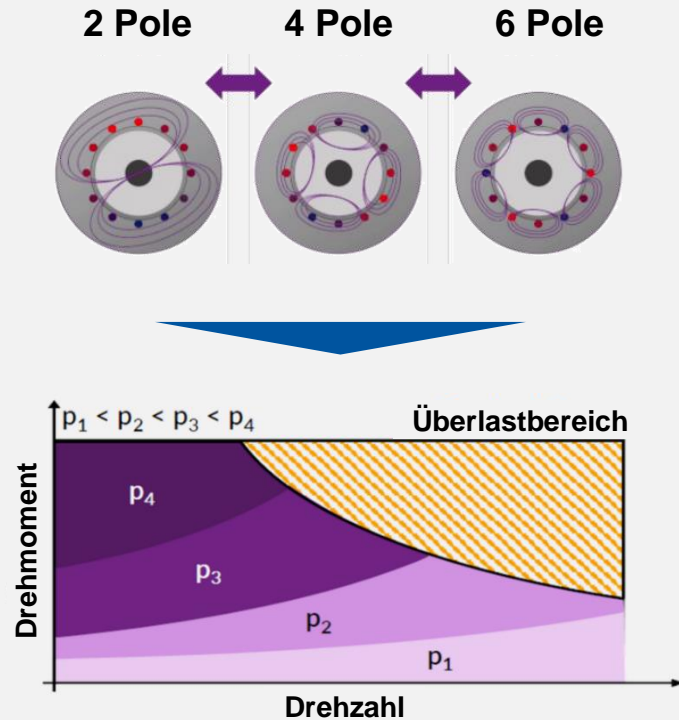


- Das Kühlmedium (Wasser, Glykol etc.) befindet sich im Inneren der rechteckigen Hohldrähte
- Die Wärme kann dadurch unmittelbar am Ort ihrer Entstehung abgeführt werden

Durch die gezeigten Kühlkonzepte wird die Wärmeentwicklung im Hairpin-Stator deutlich reduziert. Die Herausforderungen bestehen in der komplexen Herstellung von Hohldrähten sowie in zusätzlich erforderlichen Komponenten.



Konzept von virtuellen Getrieben



→ Variation der Polzahl während des Fahrbetriebs

→ Kontinuierliche Anpassung des Getriebes an das Lastprofil

Vorteile virtueller Getriebe

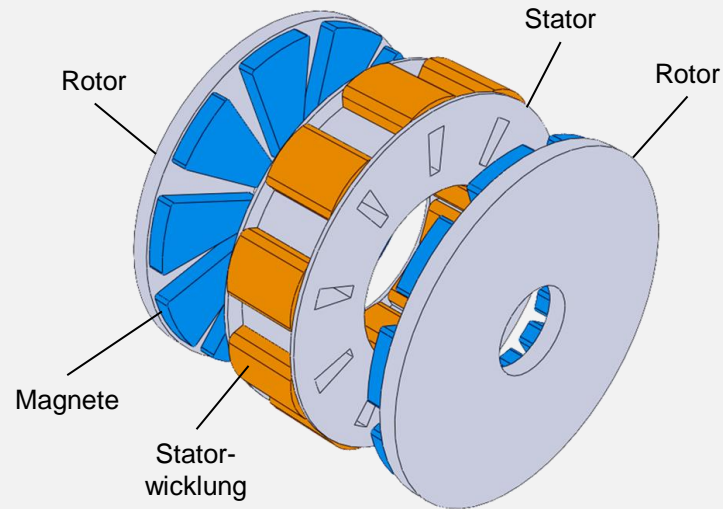
- **Gesteigerte Effizienz:**
Durch Variation der Polpaarzahl und den Einsatz von MOSFETs kann ein deutlich höherer Wirkungsgrad erreicht werden.
- **Sicherheit:**
Die 48-V-Technologie ist „von Natur aus“ sicher und ermöglicht darüber hinaus Kosteneinsparpotenziale durch den Wegfall von Hochspannungsschutzmaßnahmen.
- **Höhere Redundanz:**
Bei Ausfällen innerhalb von Stangen oder in den Leistungselektronikeinheiten ist der Antrieb weiterhin in der Lage, mit leicht verminderter Leistung zu arbeiten.



Durch die Variation der Polzahl während des Fahrbetriebs bieten virtuelle Getriebe die Möglichkeit, den Lastpunkt des Elektromotors an das Lastprofil anzupassen und somit den Wirkungsgrad deutlich zu erhöhen.



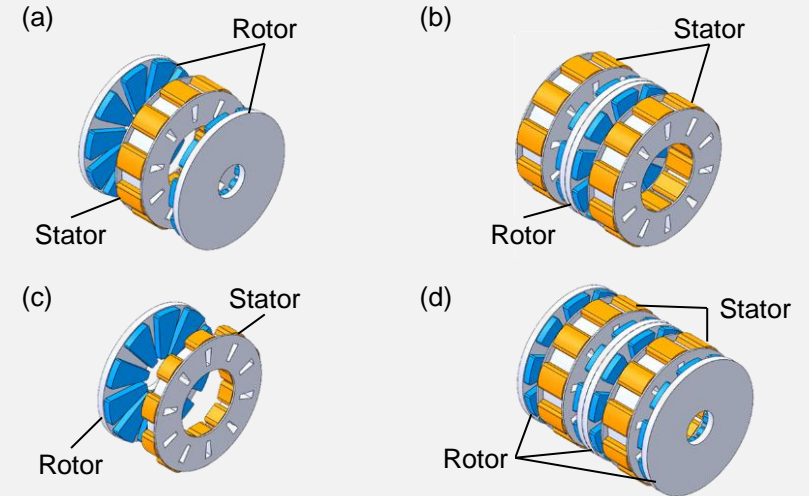
Bauweise von Axialflussmotoren



- Magnetfelder bilden sich in axialer Richtung aus
- Sehr hohes Drehmoment und Leistungsdichte
- Zielanwendungen mit hoher Drehmomentdichte und reduziertem Platzbedarf



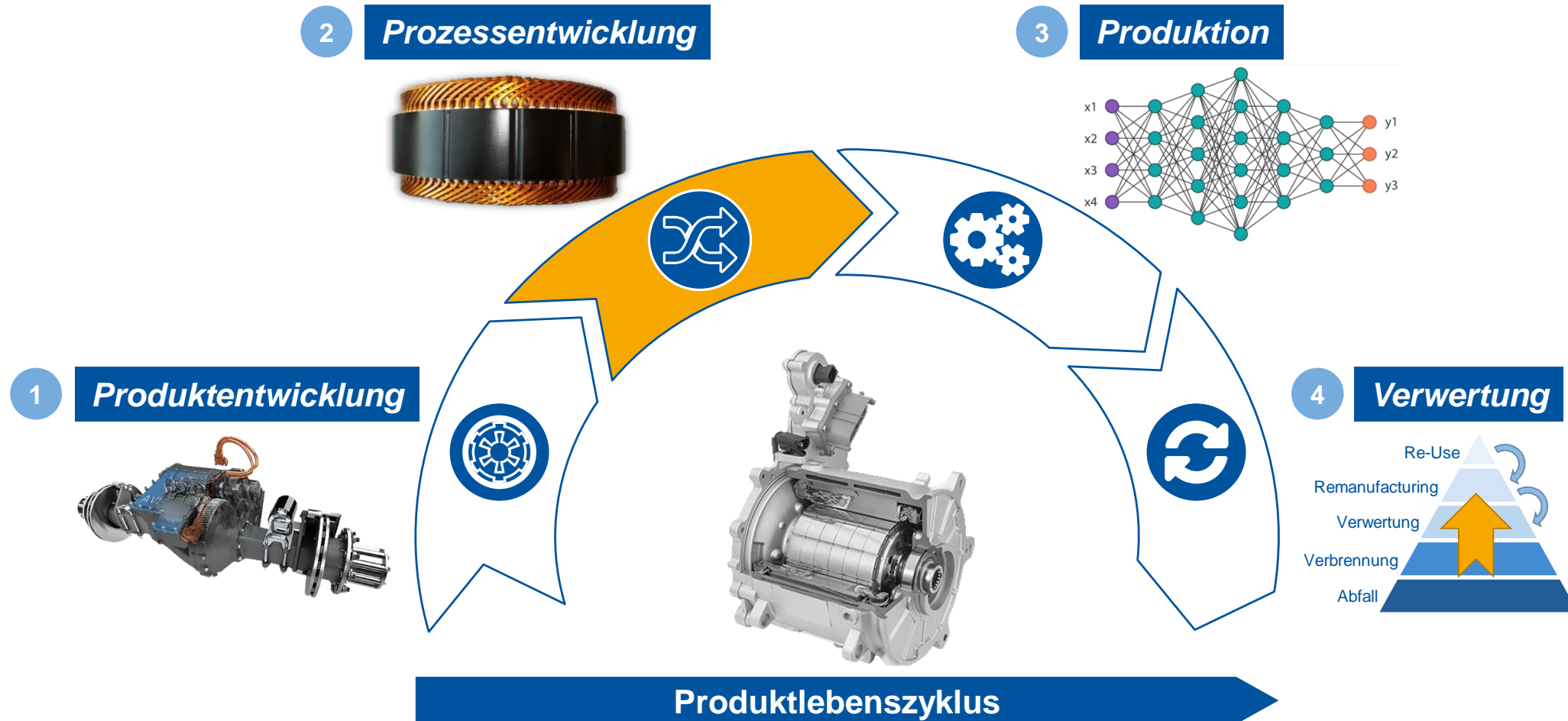
Aktuelle Trends



Doppelrotor (a), Doppelstator (b), Einzelrotor und Stator (c), Gestapeltes System (d)

- Oftmals keine Getriebeuntersetzung erforderlich
- Motoren können modular „gestapelt“ werden (Baukasten)
- Höhere Geschwindigkeiten/Wirkungsgrade bei geringerem Gewicht

Der Axialflussmotor besitzt einige produkttechnische Vorteile gegenüber Radialflussmotoren (z.B. höhere Leistungsdichte). Typische Einsatzbereiche sind Hochdrehzahlanwendungen (beispielsweise in Sportwagen).





Nutisolation

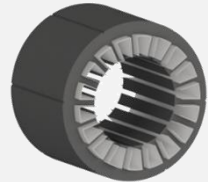
State of the art: Flächenisolation

- Manuelles oder vollautomatisiertes Schneiden und Formen des Flächenisolierstoffs, Auskleidung der Nuten, Verfestigung und abschließende Entfernung von Überständen

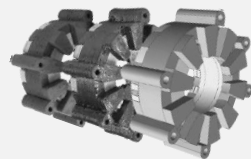
Innovationen:

- Pulverisolation
- Polymerisolation
- 3D-Druck (hohe Designfreiheit)
- Integration der Nutisolation in die Leiterisolation

Flächenisolation



3D Druck



Wicklung

State of the art: Wicklung & Hairpin

- Hochstochastisches Einziehwickeln
- Automatisierte Hairpin-Technologie im hochvolumigen Traktionssektor
- Material: Hoher Anteil von Kupfer

Innovationen:

- Größerer Leiterquerschnitt pro Nut
- Kontinuierliche Hairpin-Wicklung
- Komplexere Wickelschemata

Nadelwicklung



Continuous Hairpin



Rotorproduktion

State of the art: Rotormagnete

- Hohes Schleppmoment (PSM)
- Laminierung des Blechpakets erforderlich
- Verwendung von seltenen Erden (für Magnete)

Innovationen:

- Gewickelte FSM-Rotoren
- Gegossener Rotorkäfig aus Kupfer
- Montierter Rotorkäfig aus Kupfer

PSM Motor



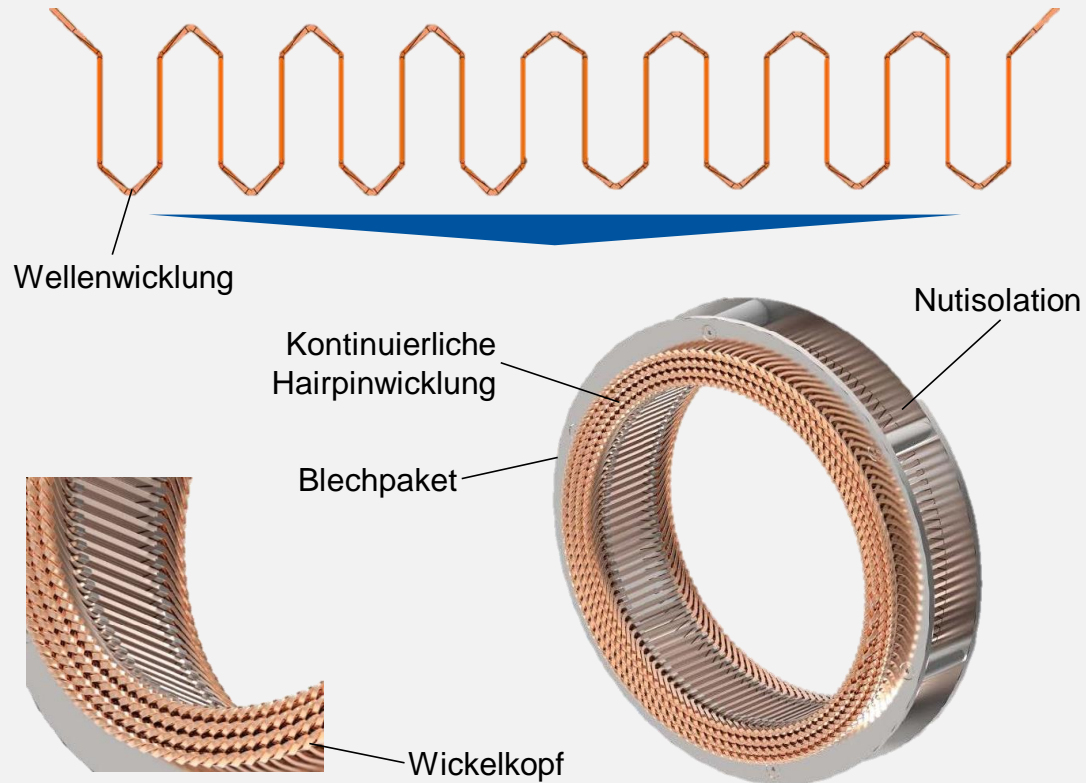
FSM Motor



Im Bereich der Wicklungen ist insbesondere die kontinuierliche Hairpin-Wicklung ein hochaktuelles Forschungsfeld.



Kontinuierliche Hairpin-Wicklung



Produkt- und prozesseitige Bewertung



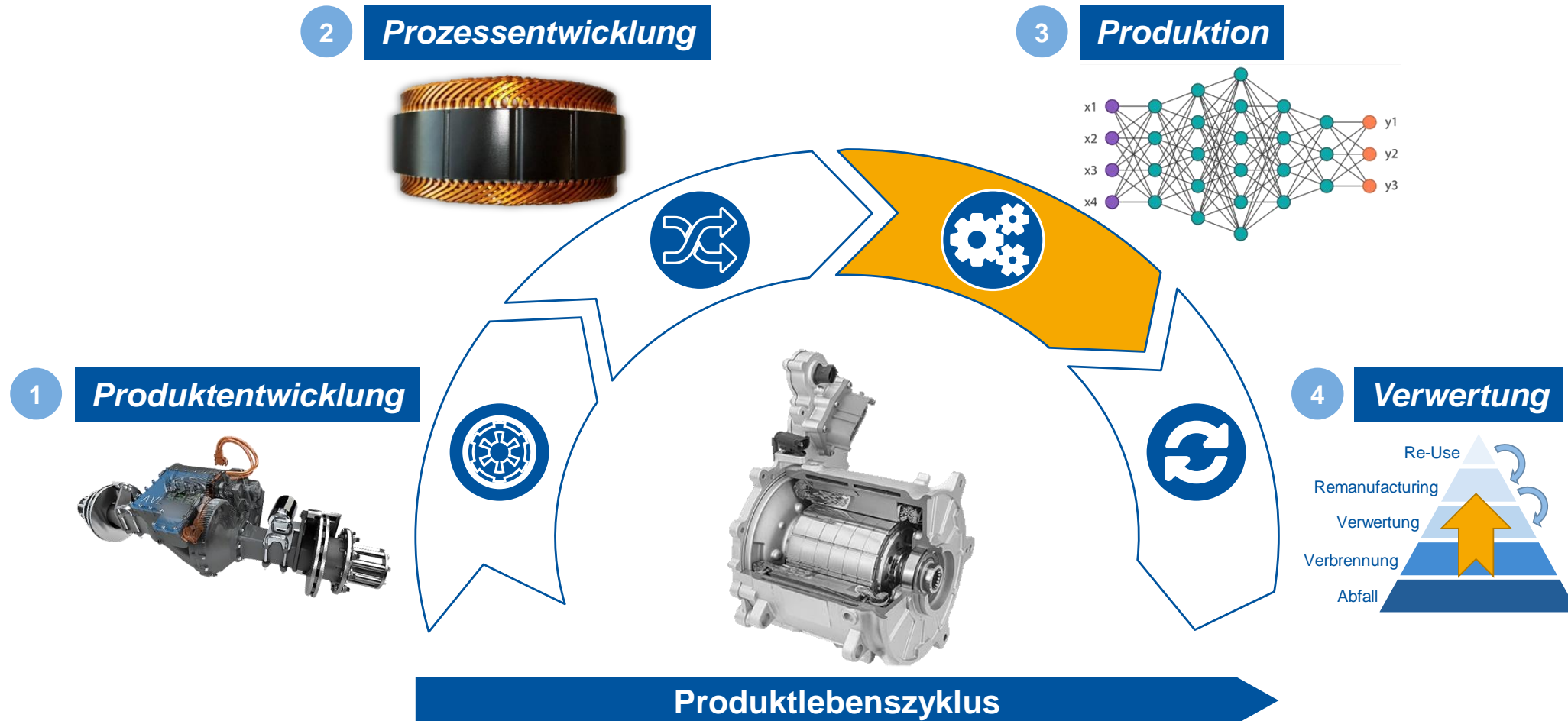
Produkt

- Geringe Wickelkopfhöhe beidseitig
- Nachteiliges Design der Stator-Öffnung führt zu geringerer Effizienz in bestimmten Anwendungsfällen

Prozess

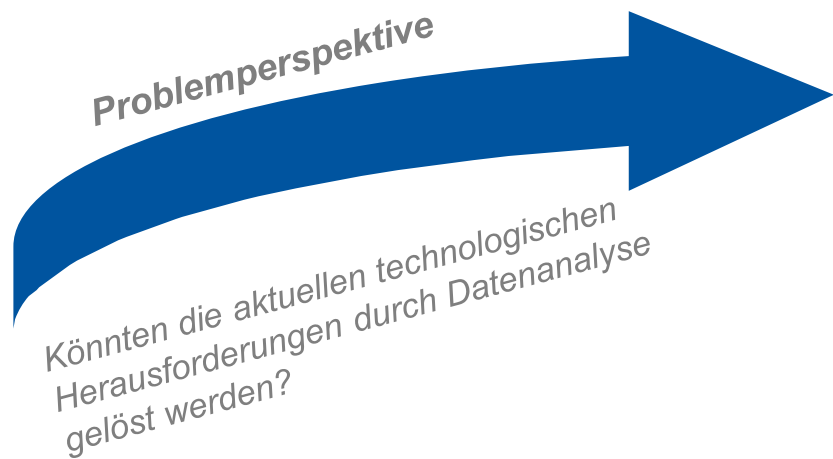
- Hohe Komplexität der Biege- und Montagevorgänge
- Entfall der aufwändigen Schweißvorgänge

Die aufwändigen Kontaktierungsprozesse im Rahmen der Standard-Hairpin-Produktion (U-Pin) werden durch komplexe Biege- und Montageprozesse ersetzt.

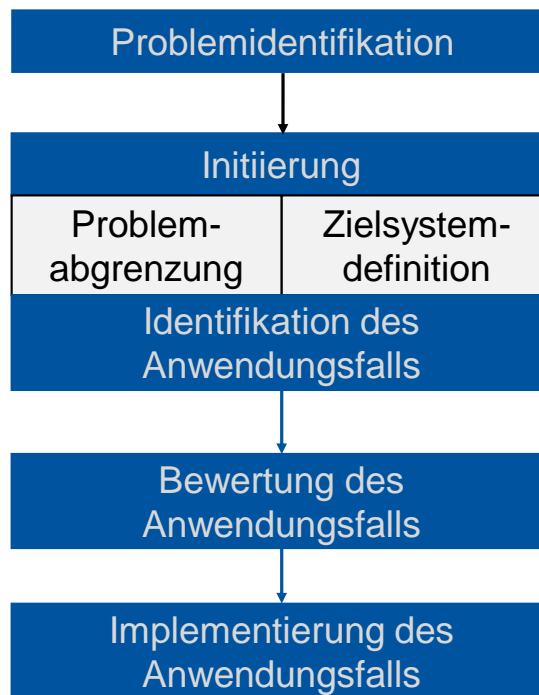


Innovation im Bereich Produktion

Data Analytics in Elektromotorenproduktion



- Fokus**
- Technologische Herausforderungen
 - Prozessoptimierungen
 - Rückverfolgbarkeit
 - Prozessverständnis
 - Technologische Erkenntnisse aus dem Prototypenbau



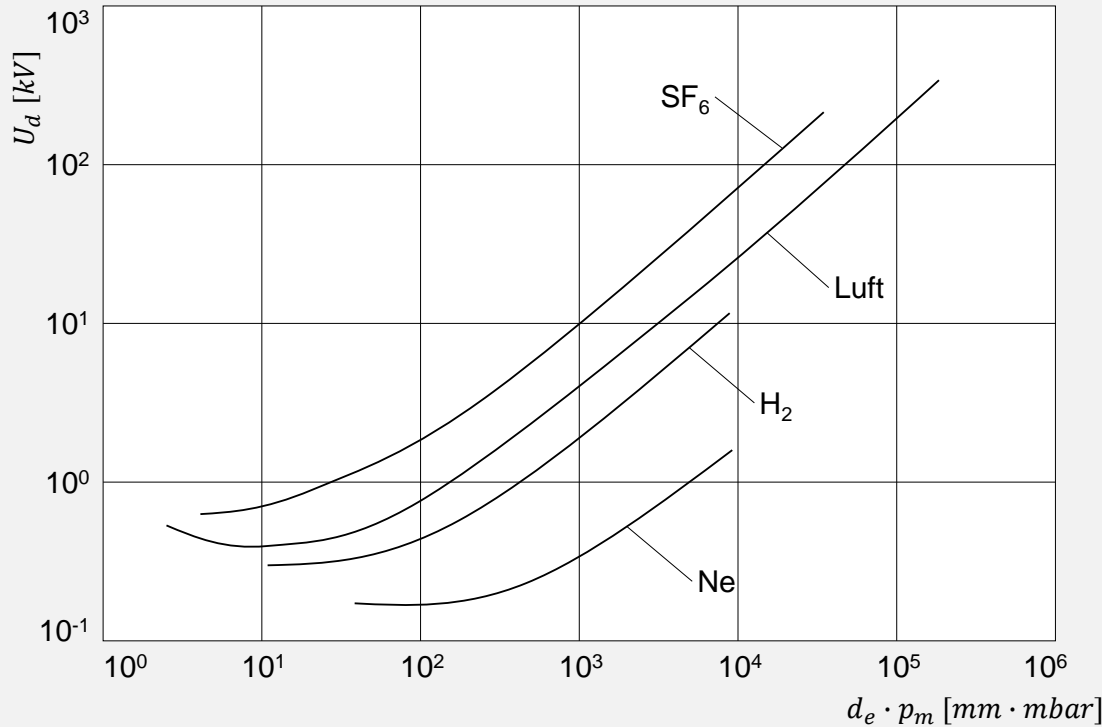
- Fokus**
- Suche nach Möglichkeiten zur Implementierung von Datenanalyseverfahren
 - Datengesteuerte Anwendungen
 - Verfügbarkeit von Daten
 - Konsistenz der Daten

Die vielfältigen Möglichkeiten von Data Analytics müssen schon in der Produktionsplanung berücksichtigt werden, um die Effizienz bereits in der Anlaufphase der Produktion zu steigern.



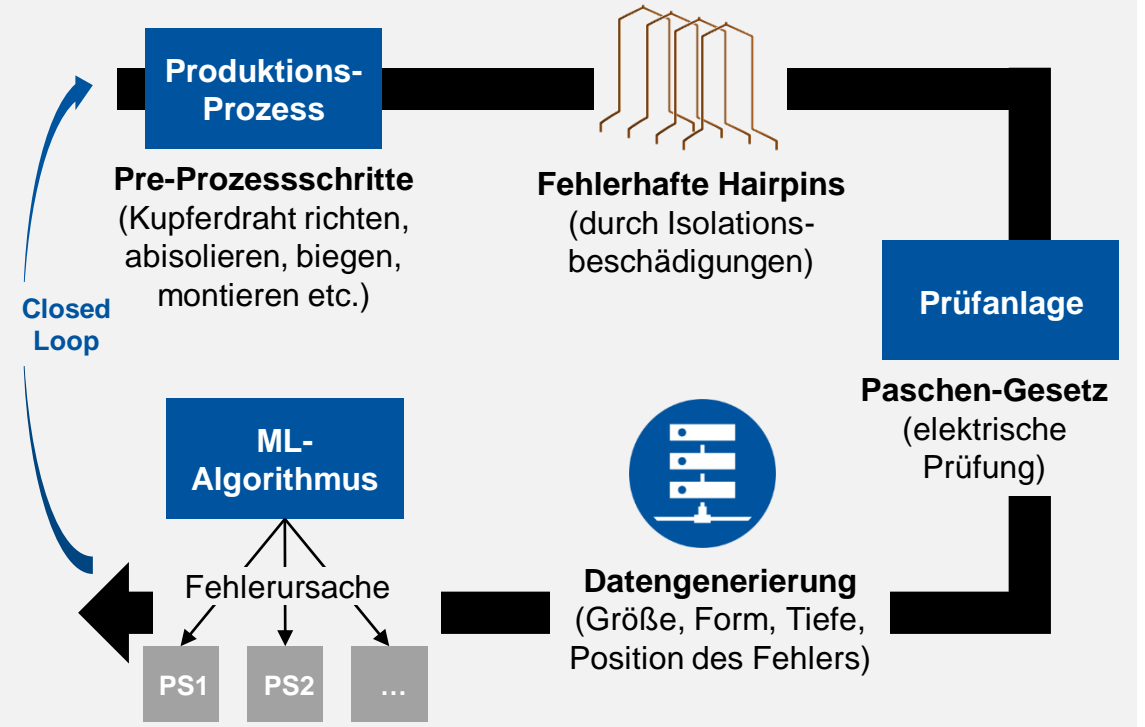
Neuartige Prüfmethodik für Hairpins

→ Detektion von Isolationsfehlern durch Paschen-Gesetz

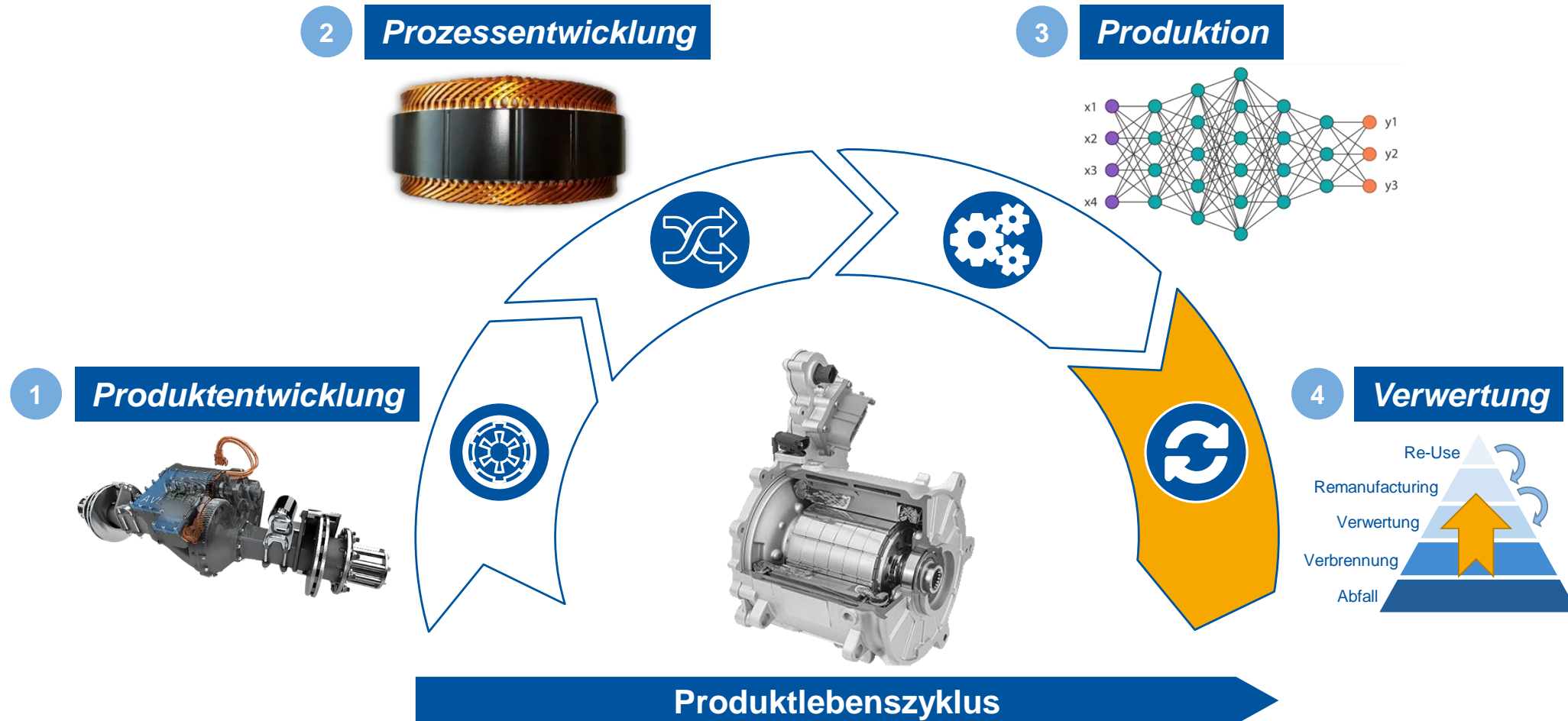


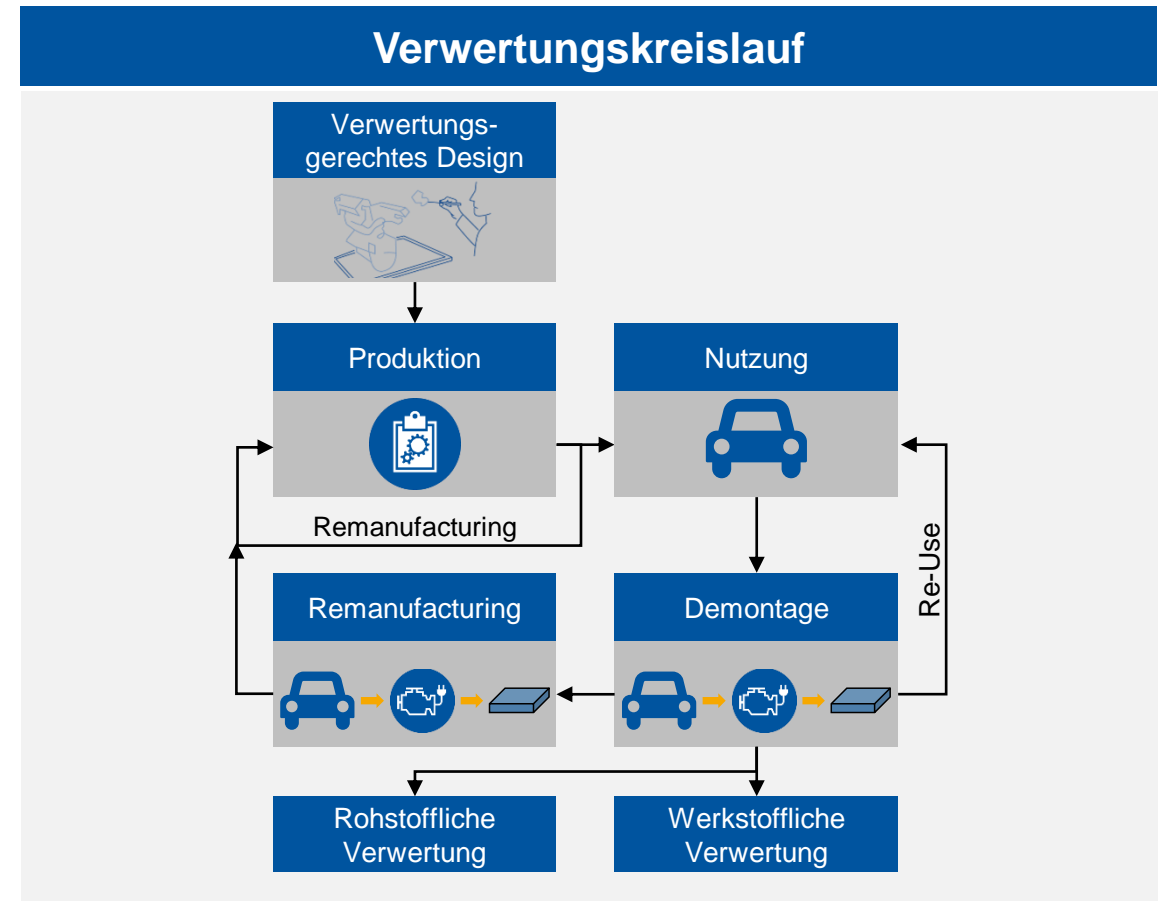
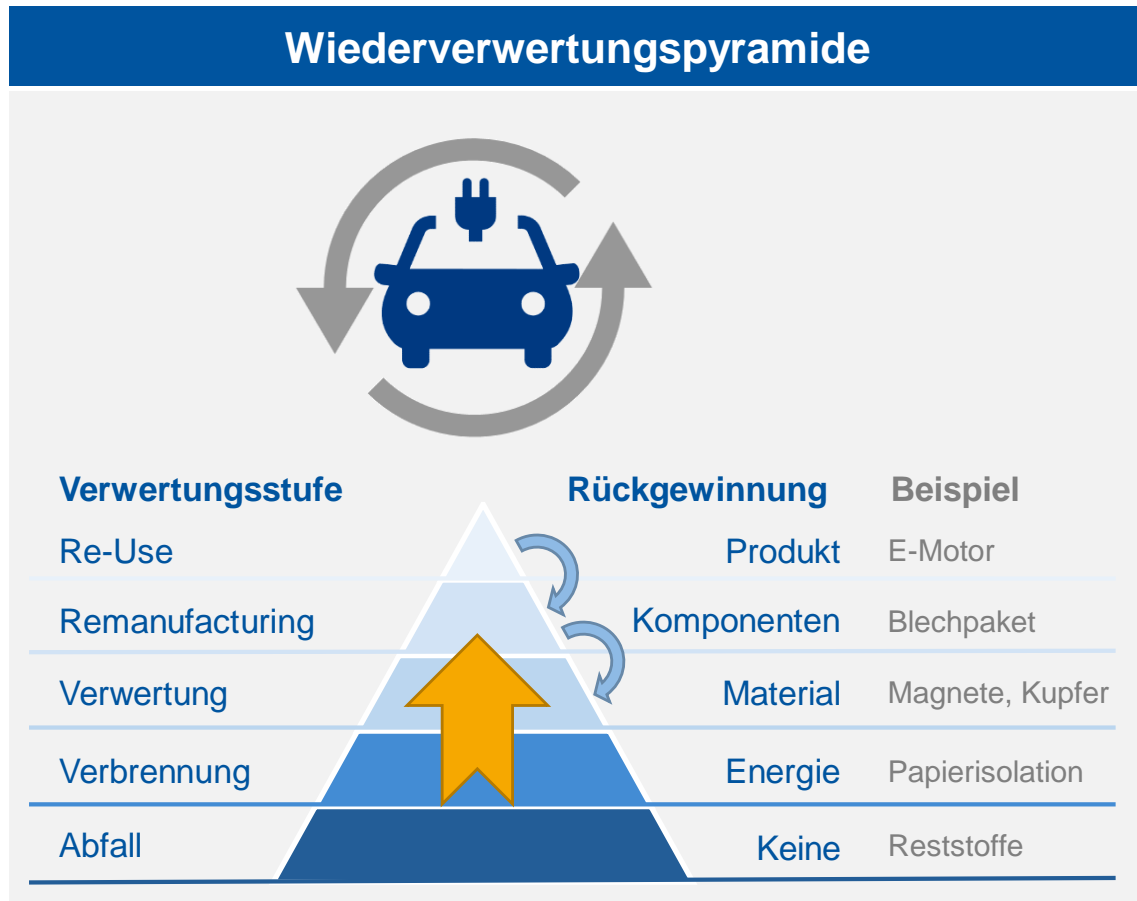
Integriertes Machine Learning-Konzept

→ Automatisierte Ermittlung von Fehlerursachen



Im Rahmen der Prüfung können sowohl einzelne Hairpins (inline) als auch ganze Statoren (end of line) auf Isolationsfehler geprüft werden.

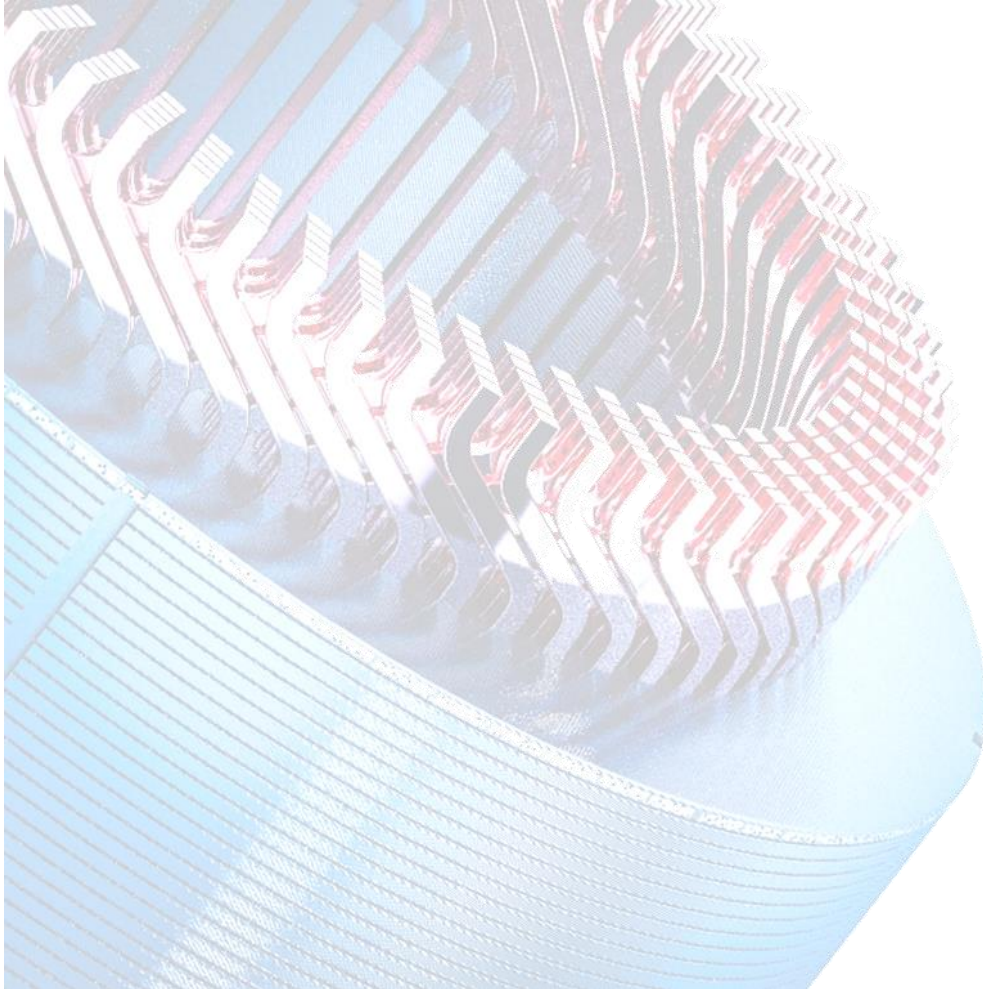




Insbesondere Demontagekonzepte rücken im Rahmen der Elektromotorenproduktion in den Fokus, wodurch die Wiederverwertungsquote nachhaltig erhöht wird.

Innovationen in der Produktarchitektur elektrischer Maschinen

In diesem Vortrag wurden...



... varianten- und stückzahlflexible Produktionssysteme als nächste Kernherausforderungen identifiziert

... innovative Ansätze aus der Produkt- und Prozessentwicklung sowie der Produktion und Verwertung gezeigt

... beispielhafte Innovationen wie neuartige Kühlkonzepte und intelligente Prüfmethode erläutert

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!



Sebastian Kawollek, M.Sc.

Chair of Production Engineering of E-Mobility Components
Oberingenieur

Bohr 12

D-52072 Aachen

Tel.: +49 (0) 151 / 40718836

Mail: s.kawollek@pem.rwth-aachen.de