



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

**VERSE**

**Vollintegriertes autonomes Einzelzahnmodul mit  
integrierter SiC-Leistungselektronik für  
Elektroantriebe**

# **Abschlussbericht**

## **(Sachbericht Teil I - Kurzbericht)**

<b>Zuwendungsempfänger</b>	VOLKSWAGEN AKTIENGESELLSCHAFT 38436 Wolfsburg
<b>Förderkennzeichen</b>	16EMO0272
<b>Vorhabensbezeichnung</b>	Vollintegriertes autonomes Einzelzahnmodul mit integrierter SiC-Leistungselektronik für Elektroantriebe  Teilvorhaben: „Fahrzeugspezifische Anforderungen, Systembewertung und Test für Traktionsantriebe“
<b>Laufzeit des Vorhabens</b>	01.10.2018 – 01.10.2021
<b>Autoren</b>	Hermann Wetzel, Holger Amecke, Dr. Robert Plikat, Dr. Christian Mertens

**Ergebnisse der Volkswagen AG aus dem Förderprojekt VERSE, Förderkennzeichen 16EMO0272**

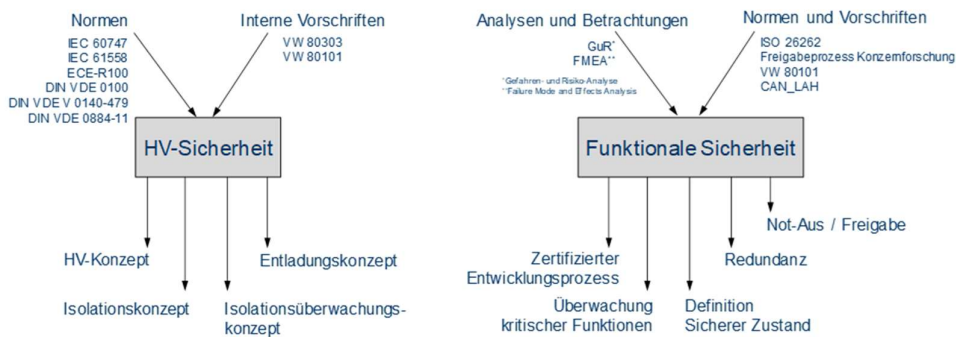
Das Forschungsprojekt VERSE hat sich mit der Erforschung von integrierten Bausteinen für modulare Antriebssysteme befasst. Diese bezogen sich sowohl auf Hybrid und reine Elektrofahrzeuge in kleineren Leistungsklassen als auch auf die ganze Palette von Industrieantrieben auf Basis von Siliziumkarbid(SiC)-Halbleitern. VERSE erforschte dabei vollintegrierte autonome Einzelzahnmodule mit SiC-Halbleiterbauelementen, die als Baukastenelektronik in Mehrfachkombination als integriertes elektrisches Antriebssysteme eingesetzt werden können. Die Funktionsintegration in die Elektronikmodule, dezentrale Regelung sowie robuste Modulschnittstellen sollten die einfache Adaption in verschiedene Anwendungen und Leistungsklassen sowie den Wegfall bzw. Minimierung von zentralen Komponenten ermöglichen. Voraussetzung und Startpunkt für die Zusammenarbeit im Konsortium dieses Projekts war das Verbundprojekt EMiLE: Elektro-Motor integrierte Leistungs-Elektronik – EMiLE (Förderkennzeichen 16EKF0002), welches vom BMBF in der Laufzeit von 2013 – 2017 gefördert wurde. Der wesentliche technische Prinzipnachweis für einen Antrieb mit Einzelzähnen konnte in dem Projekt erbracht werden, es zeigten sich jedoch grundlegende Fragestellungen, die in dem hier berichteten Förderprojekt VERSE beantwortet wurden.

Die Volkswagen AG hatte in diesem Projekt die klassische Rolle eines OEMs in dem sie Anforderungen, Spezifikationen, die Umsetzbarkeit und Verwertbarkeit von Ergebnissen bewertet und kommentiert hat. In dem Rahmen wurde eine vergleichende Spezifikation erarbeitet (Abbildung A) an der sich die Antriebsanforderungen orientierten.

		EMILE	E-GOLF heute	Antrieb 2020
Dauerleistung	kW	50	50	>60
Peakleistung	kW	80	100	>140
Maximaldrehzahl	1/min	14000	12000	16000
Dauermoment	Nm	155	160	180
Peakmoment	Nm	245	290	300
Länge (Gehäuse, aussen)	mm		420	400
Durchmesser (Gehäuse, aussen)	mm	215	250	250
Gewicht Gesamtantrieb	kg		103	90

**Abbildung A. Antriebsanforderungen im Projekt VERSE**

Ausgehend von dieser groben Anforderung, wurden die weiteren für die spezifische Struktur des verteilten Antriebes aus autonomen Einzelzähnen erforderlichen Anforderungen erarbeitet. Ein fundamentaler Satz von Anforderungen ergibt sich aus den Sicherheitsanforderungen für das Fahrzeug, der sich in Hochvoltsicherheit und funktionale Sicherheit zergliedern lässt (s. Abbildung B).



**Abbildung B. Anforderungen an die Sicherheit elektrischer Traktionsantriebe im Projekt VERSE**

Im Projekt wurden sowohl die spezifischen Anforderungen für ein verteiltes System im Hochvoltbereich detailliert als auch ein Vernetzungs- und Kommunikationssystem sowie ein Satz zugehöriger Anforderungen für die funktionale Sicherheit im Detail formuliert. Hierbei wurde auch

explizit die Zusatzfunktion der Redundanz der Einzelzähne reflektiert und die Fragestellung nach der Zuverlässigkeit des Betriebs erörtert.

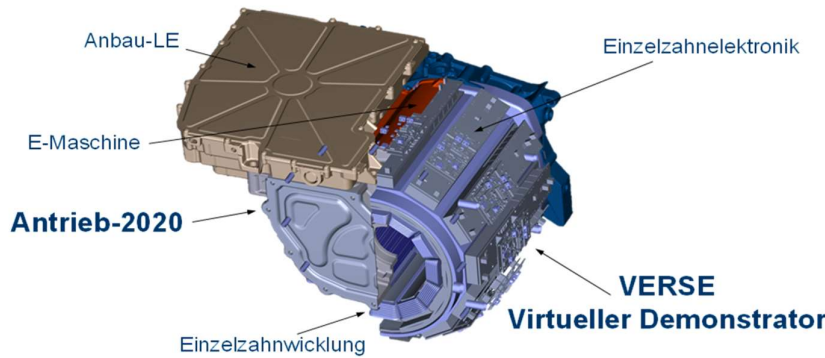
Im Rahmen der Antriebskonzeptionierung wurden mehrere mechatronische Ansätze und deren Bewertungskriterien erarbeitet, so dass eine Konzeptbewertung vorgenommen werden konnte. In kompakter Darstellung ergab sich hierzu die tabellarische Zusammenfassung in Abbildung C.

Kühlkonzepte	Anzahl-Kühlkörper (2)	Anzahl-Dichtungen (2)	Komplexität der Kühlungsanbindung (2)	Kühlleistung (2)	Einbaukomplexität (2)	Schnittstellen (1)	Zusätzl. Gehäuse (1)	Außendruckmesser (1)	Länge des Motors (1)	Zusätzl. Bauteile (1)	Thermische Entkopplung Zahnspule / Elektronik (2)	Kühlmassendurchfluss und -druck	EMV (2)*	Realisierbarkeit „Golf 2020“ (3)**	Punktzahl
1) Tauschbare Elektronik	-1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	0	1	-1			-1	-5
2) Echtes Gleichteilkonzept	-1	-1	-1	1	1	0	1	1	0	1	-1			-1	-1
3) Zentrale Entwärmung	1	1	-1	0	-1	-1	1	1	0	1	-1			-1	4
4) Bosch Elektronik außen Pin Fin	1	0	1	1	0	0	-1	0	1	0	1			0	8
5) Bosch / IISB Elektronik außen	1	1	1	0	0	1	-1	0	1	0	1			0	9

**Abbildung C. Bewertungsmatrix der Integration der Zahnelektronik**

Basis für diese Konzepte sind detaillierte technische Konstruktionen, die in den Fachkreisen im Detail abgestimmt und inhaltlich bis zur Detailzeichnung, zu Layouts und Bestückungsplänen sowie Softwarefunktionen umgesetzt wurden. Im Projektverlauf wurde kein Komplettdemonstrator aufgebaut, weil eine Vermessung eines Gesamtantriebes bereits in der Projektantragsphase für zu aufwändig erachtet wurde – es wurden jedoch einige Laboraufbauten erstellt, die jeweils in den Schnittstellen mit Volkswagen abgestimmt wurden.

Der virtuelle, digitale Zusammenbau aller Komponenten zu einem Gesamtantrieb wurde für eine abschließende Bewertung des Ansatzes zur Verfügung gestellt und durch Volkswagen bewertet. Ein Vergleich im Bauraum, wie er in Abbildung D dargestellt ist, zeigt, dass sich die Konzeption des Antriebes auf Basis des autonomen Einzelzahns im ersten Ansatz nicht bewährt, weil der zur Verfügung stehende Bauraum verletzt wird.



**Abbildung D: Übersichtsdarstellung zum Vergleich: Antrieb-2020 und Einzelzahntrieb.**

Auf der linken Seite in Abbildung D. erkennt man den Serienantrieb und auf der rechten die VERSE-Lösung. Die Elektromaschine nimmt den gleichen Bauraum in Anspruch, die Elektronik lässt sich jedoch nur ungünstig am Umfang positionieren. Daraus folgt, dass die Bodengrenzzlinie im Fahrzeug und auch der maximale mögliche Beugungswinkel der Achswellen überschritten werden. Das heißt im Fazit jedoch nicht, dass der Antrieb keine Perspektive hat, sondern, dass eine weitere Integration der Elektronik erforderlich wird, um die nachweislichen Vorteile des VERSE-Ansatzes tatsächlich erschließen zu können.



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

## VERSE

**Vollintegriertes autonomes Einzelzahnmodul mit integrierter SiC-Leistungselektronik für Elektroantriebe**

# Abschlussbericht

(Sachbericht Teil II – Eingehende Darstellung)

<b>Zuwendungsempfänger</b>	VOLKSWAGEN AKTIENGESELLSCHAFT 38436 Wolfsburg
<b>Förderkennzeichen</b>	16EMO0272
<b>Vorhabensbezeichnung</b>	Vollintegriertes autonomes Einzelzahnmodul mit integrierter SiC-Leistungselektronik für Elektroantriebe  Teilvorhaben: „Fahrzeugspezifische Anforderungen, Systembewertung und Test für Traktionsantriebe“
<b>Laufzeit des Vorhabens</b>	01.10.2018 – 01.10.2021
<b>Autoren</b>	Hermann Wetzel, Holger Amecke, Dr. Robert Plikat, Dr. Christian Mertens

## Inhaltsverzeichnis

1	Aufgabenstellung.....	3
2	Voraussetzungen für das Vorhaben und Zusammenarbeit im Konsortium.....	3
3	Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens .....	3
4	Projektplanung und Verlauf .....	4
5	Projektergebnisse.....	4
5.1	Systemspezifikation.....	4
5.1.1	Definition von KFZ-spezifischen Anforderungen an den Antrieb .....	4
5.1.2	Sichtung und Beurteilung verfügbarer Komponenten hinsichtlich Weiterentwicklung bereits vorhandenen Teiltechnologien .....	6
5.1.3	Fahrzeugspezifische Sicherheitsanforderungen an den E-Antrieb.....	6
5.2	Technologieerforschung.....	10
5.2.1	Beurteilung der LE-Modulkonzepte .....	10
5.2.2	Festlegung und Bewertung geeigneter Regelkonzepte für eine dezentrale Regelung.....	11
5.2.3	Konzeption einer automotive-geeigneten Kommunikation .....	12
5.2.4	Konzeptbewertung der autonomen Spannungsversorgungseinheit.....	13
5.3	Systemkonzepte, Bewertung der Technologie.....	15
5.4	Kommunikation und Regelung .....	19
5.5	Validierung .....	19
6	Verwertbarkeit und Nutzen der Ergebnisse .....	20
7	Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen .....	21
8	Veröffentlichungen, Literatur .....	21
9	Verwendete Quellen.....	21

## **1 Aufgabenstellung**

Das Forschungsverbundprojekt VERSE befasste sich im Konsortium der Firmen Aix-Control, AVL, Lenze, Bosch, Siemens, VW und ZF Sachs und Fraunhofer und RWTH Aachen als Forschungseinrichtungen mit der Erforschung von integrierten Bausteinen für modulare Antriebssysteme. Diese beziehen sich sowohl auf Hybrid und reine Elektrofahrzeuge in kleineren Leistungsklassen als auch auf die ganze Palette von Industrieantrieben auf Siliziumkarbid(SiC)-Basis. VERSE erforscht dabei vollintegrierte autonome Einzelzahnmodule mit SiC-Halbleiterbauelementen, die einen zentralen Baustein auf dem Weg zu großserienfähiger Baukastenelektronik für zukünftige kostengünstige integrierte elektrische Antriebssysteme darstellt. Die Funktionsintegration in die Elektronikmodule, dezentrale Regelung sowie robuste Modulschnittstellen ermöglichen die einfache Adaption in verschiedene Anwendungen und Leistungsklassen sowie den Wegfall bzw. Minimierung von zentralen Komponenten. Parallel hierzu erfolgt die Eignungsuntersuchung der Komponenten im Antriebssystem für hohe Spannungssteilheiten der SiC Bauelemente in der Leistungselektronik und deren Rückwirkung auf das Isolationssystem der Elektromaschine.

## **2 Voraussetzungen für das Vorhaben und Zusammenarbeit im Konsortium**

Die Aufgabenstellung der Volkswagen AG war in diesem Projekt vor allem eine bewertende und strukturierende. Die technischen Innovationen wurden im Wesentlichen von den Projektpartnern erarbeitet, eine Diskussion, eine Bewertung und Entscheidung zu der Weiterbildungsrichtung wurde jeweils wesentlich von Volkswagen vorbereitet und festgelegt. Damit entsprach die Rolle der Volkswagen AG in diesem Projekt sehr stark der steuernden Rolle eines klassischen OEM –. Entsprechend liegt das Arbeitsergebnis der Volkswagen AG auch in der Darstellung und Bewertung der im Projektverbund erreichten technischen Fortschritte. Ein eigener Musteraufbau seitens der Volkswagen AG fand im Rahmen des Projektes nicht statt. Voraussetzungen für das Vorhaben und Zusammenarbeit im Konsortium dieses Projektes war das Verbundprojekt EMiLE: *Elektro-Motor integrierte Leistungs-Elektronik* – EMiLE (Förderkennzeichen 16EKF0002), welches vom BMBF in der Laufzeit von 2013 – 2017 gefördert wurde.

Der wesentliche technische Prinzipnachweis für einen Antrieb mit individuell angesteuerten Einzelzähnen konnte in dem Projekt erbracht werden, es zeigten sich jedoch grundlegende Fragestellungen, die in dem hier berichteten Förderprojekt VERSE beantwortet werden sollten. Dies betrifft insbesondere die Möglichkeit zur autonomen Regelung jedes Einzelzahnes mit geeignet stabiler Kommunikation und Synchronisation im Gesamtverbund der elektrischen Maschine. Aus der Vorgeschichte ergab sich auf natürliche Weise das Konsortium, welches - leicht verändert - bei dem Projekt VERSE unmittelbar an den Start gehen konnte, weil ein entsprechendes Vorwissen und das Verständnis für die Problemstellungen vorlagen.

## **3 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens**

Ein technischer Stand zu Beginn des Vorhabens in Bezug auf die autonome Regelung ist durch das BMBF-geförderte Projekt MHF4EV gegeben, bei dem es sich topologisch aber um einen Multilevel-Umrichter handelt, der vom Bauteilumfang gegenüber einer normalen Umrichtertopologie deutlich

erhöht ist. Bei diesem Projekt waren inhärente Redundanz zur Beherrschung von Fehlerfällen und die Eignung von Topologie und Komponenten für den Einbau in eine auf die Topologie abgestimmte elektrische Maschine im Fokus. Die für die angestrebte Leistungsklasse übliche Batteriespannung im Bereich 200 bis 400 V wird hierbei durch die Reihenschaltung von Submodulen erreicht, die mit MOSFET-Schaltern mit einer Spannungsfestigkeit kleiner 100 V realisiert sind.

Für das Projekt Verse ist jedoch vor allem das Vorgängerprojekt EMiLE als technischer Stand in Bezug auf das Maschinenkonzept und die erforderliche leistungselektronische Topologie zu betrachten, denn die offenen Fragestellungen des Förderprojektes EMiLE stellten in dem hier vorliegenden Projekt die Startbasis dar. Wesentliche Fragestellungen leiten sich aus dem Anspruch des autonomen Einzelzahnes ab, denn hierauf fußt die Regelung und in der Konsequenz sind sowohl die regelungs- und sicherheitstechnischen Fragen als auch die Hardware spezifischen Anforderungen wie Redundanz, Package oder Geometrie des Gesamtantriebes abzuleiten. Dies war zudem auf die Erfordernisse der Verwendung der neuartigen Siliziumkarbid (SiC)-Leistungshalbleiter zu übertragen.

## 4 Projektplanung und Verlauf

In groben Schritten wurden in der **Startphase** Erkenntnisse im Bereich der Ansteuerung, der Regelung, der Redundanz und des Aufbaus gewonnen werden. In der **Spezifikationsphase** wurden die Anforderungen unter Berücksichtigung der Unterschiede zwischen Hybrid- und reinen Elektrofahrzeugen aufgestellt. In der **Technologieerforschungsphase** wurden Leistungshalbleitermodule hinsichtlich ihrer Eignung für den Fahrzeugeinsatz bewertet und geeignete Regelkonzepte für eine dezentrale Regelung erarbeitet. In der **Systemkonzeptphase** wurden die Auswirkungen der Einzelzahntopologien auf das Gesamtsystem untersucht. Die Kommunikation zwischen den Einzelzähnen spielte im Arbeitspaket „Kommunikation und Regelung“ eine entscheidende Rolle und wurde anhand der Kommunikationstests der Kommunikationsmodule im Verbundsystem verifiziert. Die Zuverlässigkeit der Ansteuerung sowie die Regelungskonzepte wurden hinsichtlich ihres Einsatzes im Kraftfahrzeug bewertet. Ein Komplettaufbau des Antriebssystems war bewusst nicht Gegenstand des Projektes, da umfangreiche Messungen am Prüfstand oder auch Fahrzeugerprobungen aus Aufwandsgründen nicht im Projekt abgebildet werden konnten.

## 5 Projektergebnisse

Die wesentliche Aufgabe der Volkswagen AG bestand in dem Verlauf des Projektes in der Beratung, Bewertung und Beurteilung der Ergebnisse für eine Eignung im Kraftfahrzeug sowie die Festlegung der Weiterarbeit der Projektpartner.

### 5.1 Systemspezifikation

#### 5.1.1 Definition von KFZ-spezifischen Anforderungen an den Antrieb

Im Unterschied zum Vorgänger-Projekt EMiLE, dessen Ergebnisse in VERSE ihre Weiterverwendung finden sollen, fokussierte sich die Volkswagen AG hier auf offene forschungsrelevante Fragestellungen. Das Vorgängerprojekt EMiLE hatte einen eindeutigen Fokus auf die Fahrzeuge der Marke Volkswagen, hier war daher auch die Entwicklungsabteilung der Marke Volkswagen PKW direkt am Projekt EMiLE beteiligt worden. So war der EMiLE-Antrieb nach den damals geltenden Spezifikationen für die E-Golf-

Maschine ausgelegt. Diese Spezifikationen konnten aus zwei Gründen für das Projekt VERSE nicht übernommen werden:

1. Die Leistungsanforderungen an den aktuellen E-Antrieb für die Fahrzeuge der Golf-Klasse sind deutlich gestiegen, sodass der EMiLE-Antrieb diese Anforderungen nicht mehr erfüllen kann.
2. Die Konzernforschung der Volkswagen AG bedient neben Volkswagen PKW noch weitere Marken im Konzern, die einen sehr breiten Spektrum sowohl in der Leistung, als auch in Kosten und in der Stückzahl der Fahrzeuge bieten.

Aus diesem Grund hat die Konzernforschung der Volkswagen AG zum Beginn der Spezifikationsphase im VERSE-Projekt eine möglichst große Schnittmenge für möglichst viele ihrer Fahrzeuganwendungen im Konzern gesucht. Aufgrund unterschiedlicher Anforderungen der Marken ist es jedoch nicht möglich, eine Spezifikation für einen einheitlichen Demonstrator zu erstellen, der allen Wünschen genügen kann. Daher wurden die wichtigsten Forschungsschwerpunkte definiert und die Teildemonstratoren im Projekt wurden so spezifiziert, dass die mit diesen Teildemonstratoren erforschten Technologien eine gute Basis für etwaige zukünftige Entwicklungen der Marken im Volkswagen Konzern in Bezug auf Einzelzahnmotoren bilden.

Beim virtuellen Gesamtdemonstrator wurde der E-Golf als Zielfahrzeug gewählt, um einen traditionellen Stückzahlträger bedienen zu können und um weitere Anwendungsfelder (z.B. Plug-In-Hybride, Brennstoffzellen-Fahrzeuge, Fahrzeuge mit höherer Antriebsleistung, etc.) durch die Skalierbarkeit des VERSE-Antriebs in einem virtuellen Demonstrator erörtern zu können.

Für eine bessere Interpretationsfähigkeit der Entwicklung, wurden im Rahmen des Projektes drei Grobspezifikationen erstellt. Eine vergleichende Darstellung der wichtigsten Antriebsdaten wurde erarbeitet: vom EMiLE-Antrieb, gefolgt vom heutigen E-Golf und einem zu Projektbeginn noch als Ausblick eingebrachten „Antrieb-2020“, der weitgehend dem inzwischen in Serie befindlichen Antrieb des ID.3 entspricht. Die Performance und Geometriedaten sind in Abbildung 1 zusammengetragen und man kann deutlich erkennen, dass die Leistungsdaten über die Weiterentwicklungszeit deutlich zunehmen.

		EMILE	E-GOLF heute	Antrieb 2020
Dauerleistung	kW	50	50	>60
Peakleistung	kW	80	100	>140
Maximaldrehzahl	1/min	14000	12000	16000
Dauermoment	Nm	155	160	180
Peakmoment	Nm	245	290	300
Länge (Gehäuse, aussen)	mm		420	400
Durchmesser (Gehäuse, aussen)	mm	215	250	250
Gewicht Gesamtantrieb	kg		103	90

**Abbildung 1: Grobspezifikationen elektrischer Traktionsantriebe im VERSE Umfeld.**

Zwischenzeitlich wurde der Prozess der Elektrifizierung in der Industrie beschleunigt und es gibt mit der New-Auto Strategie des Volkswagenkonzerns [7.] (s. Abbildung 2) eine neue Modul- und Plattformstrategie der Volkswagen AG, in der eine wesentliche technische Struktur die sogenannte



Scaleable Systems Plattform (SSP-Plattform) darstellt, die als Weiterentwicklung dieser drei Zwischenstände verstanden werden kann.

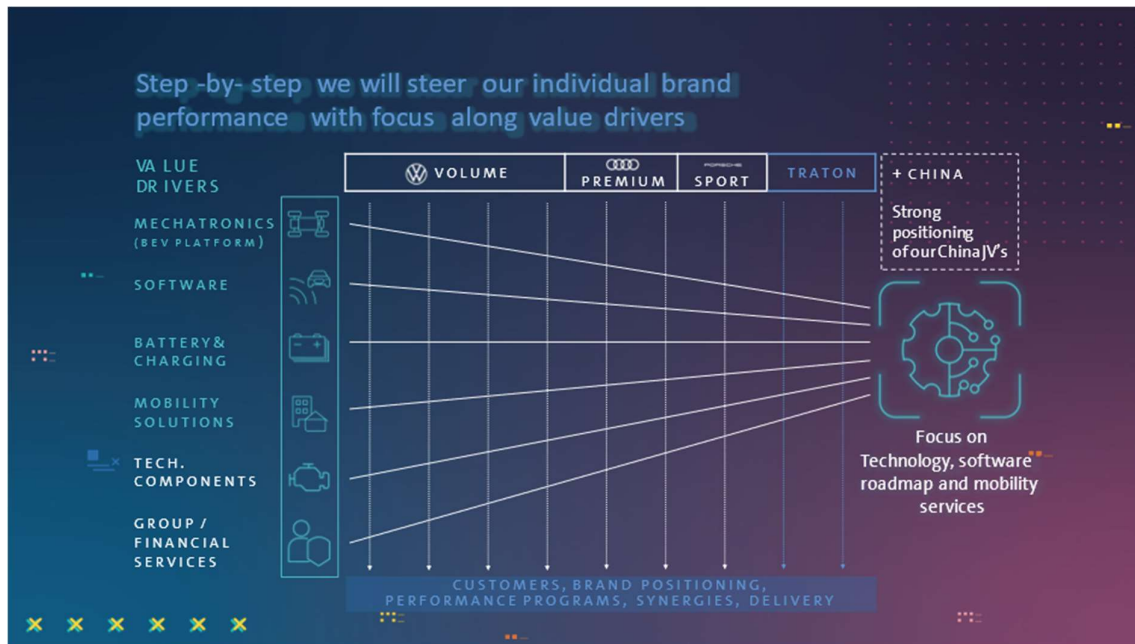


Abbildung 2. Übersicht der NEW AUTO Strategie der Volkswagen AG

### 5.1.2 Sichtung und Beurteilung verfügbarer Komponenten hinsichtlich Weiterentwicklung bereits vorhandenen Teiltechnologien

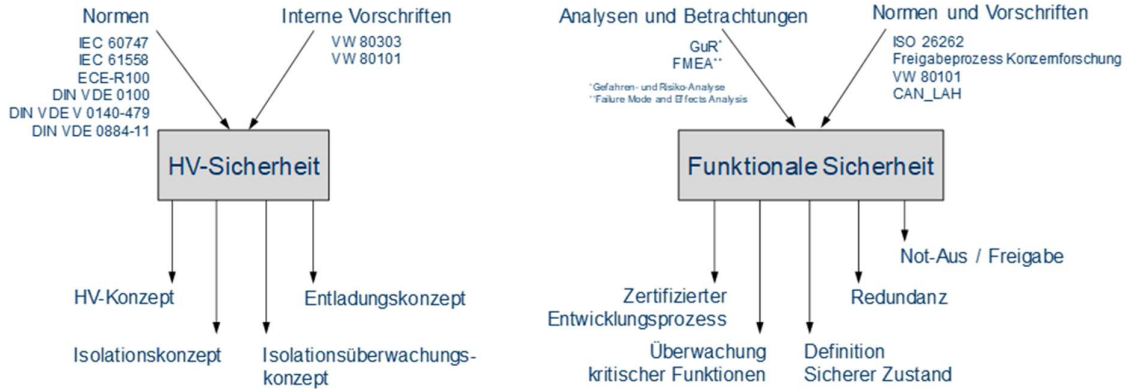
Zum Thema „Sichtung und Beurteilung verfügbarer Komponenten aus dem EMILE-Projekt“ hat Volkswagen AG eine Diskussion mit anderen Projektpartnern durchgeführt, um zunächst den Bedarf an den alten Komponenten zu erfragen und den Aufwand für eine Wiederinbetriebnahme vom EMILE-Gesamtdemonstrator abzuschätzen. Es waren zwar 2 bis 3 EMILE-Gesamtdemonstratoren bei den Projektpartnern noch vorhanden, aufgrund deutlicher Technologieunterschiede (Si anstatt SiC) und fehlendem Mehrnutzen für das Projekt VERSE erschien es jedoch wirtschaftlich nicht sinnvoll, diese Komponenten im vollen Umfang wieder in Betrieb zu setzen.

Neben den Gesamtdemonstratoren verfügten jedoch einige Projektpartner über eigene Inbetriebnahme-Muster- und Prototypen, die für die VERSE-Teildemonstratoren von Interesse waren und als Basis für die neue Technologieerforschung dienen konnten. Dadurch können die ersten Vorversuche (z.B. an Teilentladungsmessungen) bereits vor dem Vorhandensein von expliziten VERSE-Komponenten beginnen. Auch die EMILE-Prototypen der Einzelzähne gaben der aktuellen Entwicklung der VERSE-Platinen eine gute Startbasis und minimierten somit Fehler im Entwicklungsprozess.

### 5.1.3 Fahrzeugspezifische Sicherheitsanforderungen an den E-Antrieb

Das Themengebiet „Sicherheit elektrischer Traktionsantriebe“ unterteilt sich im Wesentlichen in zwei Teilgebiete: Hochvolt-Sicherheit und Funktionale Sicherheit (siehe Abbildung 3). Die Hochvolt-

Sicherheit erfordert in erster Linie die Einhaltung der Normen und Vorschriften und besteht aus einem Hochvolt-Konzept, einem Isolationskonzept, einem Isolationsüberwachungskonzept und einem Entladungskonzept. Das Besondere dabei ist, dass die einzuhaltenden Normen und Vorschriften meistens bereits auch für den Prüfstandbetrieb und nicht nur für den eigentlichen Fahrzeugeinsatz gelten.

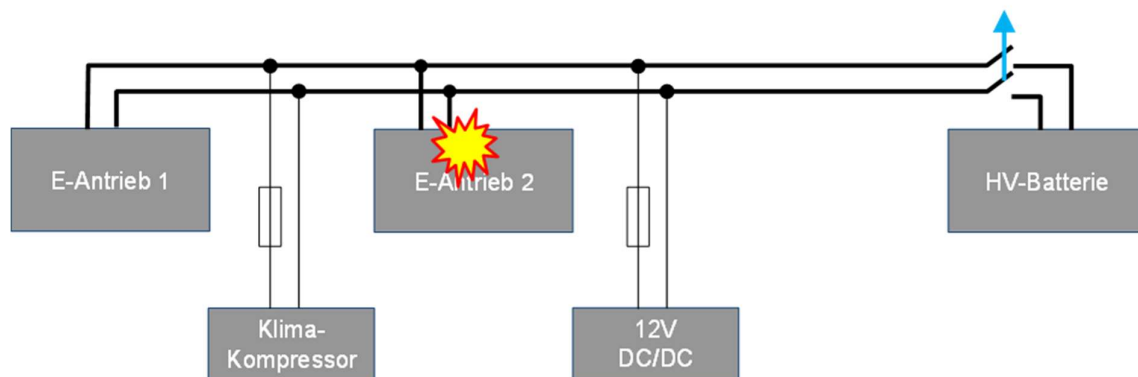


**Abbildung 3: Sicherheit elektrischer Traktionsantriebe**

Bei der funktionalen Sicherheit kommt es neben der Einhaltung von Normen, Vorschriften und Prozessen noch auf methodische Analysen und Betrachtungen, die entsprechend dem geplanten Fahrzeugeinsatz eng und spezifisch zugeschnitten sind.

Die Volkswagen AG hat das Sicherheitskonzept aus dem Vorgänger-Projekt EMiLE unter den aktuellen Randbedingungen von VERSE kritisch betrachtet und Punkte identifiziert, die im Rahmen des Projektes VERSE beantwortet und nach Möglichkeit ausgeräumt wurden und sich in den zusammenfassenden Empfehlungen abbilden.

Ein wichtiges und bei vielen Projekten immer wieder neu diskutiertes Thema jeder Sicherheitsbetrachtung ist die Notwendigkeit eines Aktiven Kurzschlusses (AKS) (= alle Motorklemmen kurzgeschlossen) der E-Maschine im Falle einer Sicherheitsabschaltung. Volkswagen sieht auch für ein VERSE-Antriebskonzept die Notwendigkeit, dass ein AKS der E-Maschine möglich sein muss. Dies wird anhand des nachfolgenden Beispiels deutlich veranschaulicht.



**Abbildung 4: Motivation der Notwendigkeit des Aktiven Kurzschlusses aufgrund HV-Sicherheit**

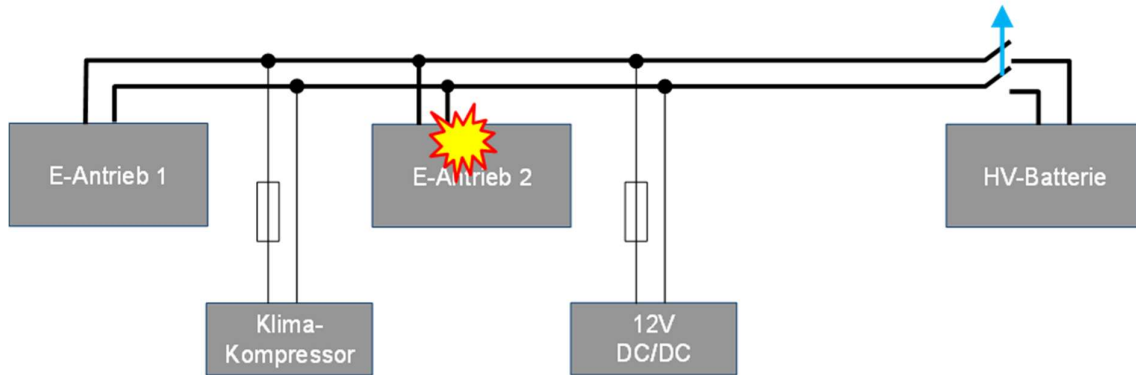
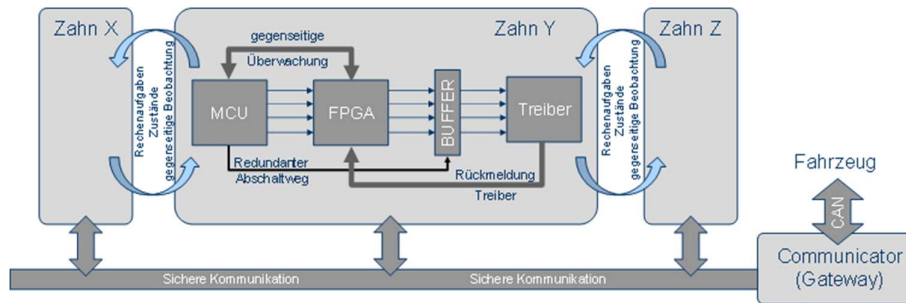


Abbildung 4 zeigt ein denkbares Szenario des Ausfalls einer Leistungselektronik, die an einem gemeinsamen HV-Netz im Fahrzeug betrieben wird. Wird ein solcher Fehler im Fahrzeug erkannt, führt dies typischerweise zum Abwurf der Batterieschütze, sodass das HV-Netz kurz darauf (eine Schnellentladung vorausgesetzt) spannungslos sein sollte. Die HV-Komponenten werden im Fehlerfall von der zentralen Steuerung in den sogenannten „Sicheren Zustand“ versetzt. Ist der Sichere Zustand bei einer Leistungselektronik als Freilauf (= alle Motorklemmen spannungslos geschaltet; damit Alternative zu einem AKS) definiert und befindet sich das Fahrzeug noch in Bewegung, wird im Falle einer permanent erregten Elektromaschine von dieser eine Spannung generiert, die entsprechend im HV-Netz des Fahrzeugs gleichgerichtet, durch die Freilaufdioden des Umrichters vorliegt. Erfolgte die Abschaltung z.B. durch eine andere Komponente als der Leistungselektronik (z.B. durch einen weiteren Antrieb wie einen Klimakompressor), bleibt diese Komponente im Sicheren Zustand weiterhin unter Spannung, was von endgültigen Zerstörung der fehlerhaften Komponente bis hin zum gesamten elektrischen Antriebsstrang im noch rollenden Fahrzeug führen kann. Erfolgt die Sicherheitsabschaltung z.B. aufgrund eines Isolationsfehlers, so führt die Spannung im HV-System zur unmittelbaren Gefährdung der Insassen. Aus diesem Grund werden von der Volkswagen AG im Projekt VERSE folgende Empfehlungen bzgl. AKS ausgesprochen:

- Bei HV-Systemen mit mehreren Verbrauchern kann die Sicherheitsabschaltung aufgrund von Problemen im HV-Zwischenkreis der Komponente erfolgen. Der Energieträger Batterie wird durch seine Schütze abgetrennt.
- Es ist sicherzustellen, dass keine weitere Einspeisung ins Traktions-HV-Netz erfolgt.
- Kurzschlussabschaltung im unteren Drehzahlbereich der E-Maschine kann unter Einhaltung bestimmter Voraussetzungen als Ausnahme akzeptiert werden.
- Auf einen aktiven Kurzschluss kann aus HV-Sicherheitsgründen im Fahrzeug nicht vollständig verzichtet werden.

Ein wichtiges Merkmal im VERSE-Maschinenkonzept ist die volle Autonomie der Einzelzähne. Dadurch kann die Redundanz des Antriebes nicht nur auf funktionaler Ebene, sondern auch für sicherheitsrelevante Aufgaben genutzt werden. Darüber hinaus verfügt die Ansteuerung der Leistungselektronik über weitere redundante Überwachungs- und Steuerungsmechanismen, die ihren wesentlichen Beitrag zur Steigerung des gesamten Sicherheitsniveaus leisten.



**Abbildung 5: Ausnutzung der Redundanz in der Ansteuerung im VERSE-Konzept**

Abbildung 5 zeigt die Möglichkeiten der Ausnutzung der Redundanz in der Ansteuerung im VERSE-Konzept. Folgende Redundanzmöglichkeiten können dabei eingesetzt werden:

- „Verzahnung“ von MCU, FPGA und Treiber zu einer zahninternen Redundanz
- Redundanz auf der Maschinenebene durch eine intelligente Kommunikation zwischen den Einzelzähnen
- Mehrschichtige Redundanz verschafft somit topologisch einen hohen Sicherheitsgrad für das VERSE-Antriebssystem.

Zusammenfassend wurden folgende Empfehlungen seitens Volkswagen AG zur Umsetzung vom Sicherheitskonzept im Projekt VERSE ausgesprochen:

- Aktiver Kurzschluss als Sicherheitsmaßnahme muss sichergestellt werden.
- Maximale EMK (= Leerlaufspannung) , Kurzschlussmoment und Kurzschlussstrom für Einzelzahn und für die Gesamtmaschine sollen bei der Maschinenauslegung hinsichtlich Realisierung eines Aktiven Kurzschlusses kritisch betrachtet werden.
- Thermische Kurzschlussfestigkeit (für E-Maschine und Leistungselektronik) ist nach Möglichkeit sicherzustellen. Auch die Überlebensdauer der Komponenten ohne Wasserkühlung (Ausfall des Kühlkreises) basierend auf der thermischen Kapazität ist bereits bei der Auslegung abzuschätzen.
- Wahlweise soll der Aktive Kurzschluss über HighSide- oder LowSide- Leistungshalbleiter gestellt werden können. Die Entscheidungstabelle dafür ist im FPGA abzulegen.
- Die im EMiLE-Projekt ermittelten Werte für die EM-Induktivität und für die Zwischenkreiskapazität sollen aktualisiert werden, um die Energiebilanz-Betrachtung beim Abwurf der Batterieschütze den neuen Randbedingungen im Projekt VERSE anzupassen.
- Eine redundante Stromversorgung aus dem HochVolt-Traktionsnetz sollte die Versorgung der Leistungselektronik beim Ausfall der 12V-Versorgung gewährleisten. Das Takten der Endstufe ist dabei nicht zwingend erforderlich.
- Es soll im Projektverlauf von VERSE kritisch geprüft werden, ob genug Sensorik auf Systemebene vorgesehen wurde, um relevante Sicherheitsprobleme zu erkennen. Dabei kann die Redundanz der gleichen Sensorik genutzt werden, um die sicherheitsrelevanten Messgrößen dadurch abzusichern.
- Eine Aktive Schnellentladung soll vorgesehen werden (z.B. Widerstand + MOSFET). Redundante Stromversorgung kann zur Entladung der Zwischenkreiskapazitäten genutzt werden, wenn möglich, dann ggf. auch als Schnellentladung.

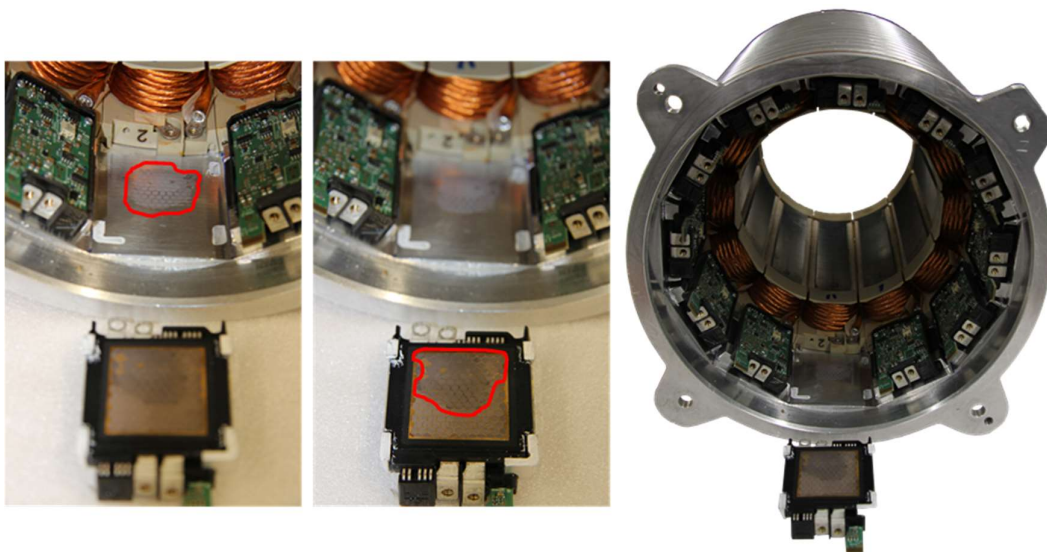
Sicherheitsanforderungen an den elektrischen Antrieb:

- Eine Dauerkurzschlussfeste Auslegung der E-Maschine ist anzustreben. So ausgelegte Permanent erregte Synchronmaschinen (PMSM) haben in der Regel keine Entmagnetisierungsprobleme beim Einleiten des Aktiven Kurzschlusses
- Ist die E-Maschine nicht dauerhaft kurzschlussfest, so sind die Zeiten der Kurzschlussfestigkeit zu ermitteln (zur Orientierung z.B. 30 Sekunden, 180 Sekunden, 10 Sekunden ohne Kühlung).
- Der drehzahlabhängige Verlauf des Abbremsdrehmoments ist zu ermitteln. Minimales Spitzenmoment im Bereich kleinerer Drehzahlen ist anzustreben.
- Das Abschalten des Aktiven Kurzschlusses im unteren Drehzahlbereich ist zulässig.
- Die Leistungselektronik ist so zu auszulegen, dass der Kurzschlussstrom dauerhaft gefahren werden kann.
- Leerlauf und Feldschwächung mit nur einem Teil der autonomen Zähne können nicht als „Sicherer Zustand“ betrachtet werden, da diese Zustände nicht immer erreichbar und aus Fahrzeugsicht nicht sicher sind (Rückspeisen ins Traktionsnetz).
- Letztgenannte Sonderfälle können zur Erhöhung der Verfügbarkeit, allerdings nicht zum Erreichen der Sicherheit herangezogen werden.
- Nur wenn ein Einzelzahn in sich dauerkurzschlussfest ist, ist ein weiterer eingeschränkter Betrieb des Gesamtantriebes möglich.

## 5.2 Technologieerforschung

### 5.2.1 Beurteilung der LE-Modulkonzepte

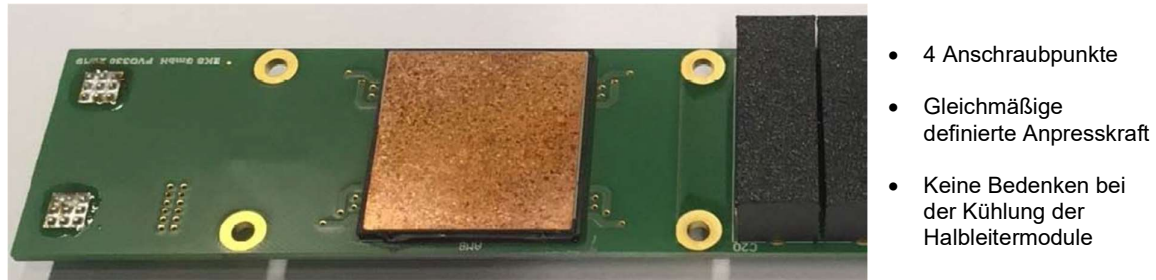
Im Rahmen der Technologieerforschung folgte die Volkswagen AG ihrer beobachtenden Rolle. Entsprechend wurde die Entwicklung des Einzelzahn-Demonstrators unter den automotive-spezifischen Gesichtspunkten kritisch betrachtet.



**Abbildung 6: Kühlungsprobleme bei den Leistungshalbleitern in EMiLE**

In diesem Zusammenhang wurde der Antrieb aus dem Vorgänger-Projekt „EMiLE“ durch Volkswagen AG zerlegt, um eventuelle Designfehler der vorherigen Entwicklung zu identifizieren und daraus konstruktive Verbesserungsvorschläge abzuleiten, die im Projekt VERSE dann zu berücksichtigen waren. Eine wesentliche Erkenntnis der Zerlegung war der Nachweis eines unzureichendes Anpressens

der EMiLE-Halbleitermodule an die Kühlfläche des axial verlängerten Maschinenkühlmantels, wodurch nur ein Teil der Modulkühlungsfläche mit dem Kühler in Kontakt kam (siehe Abbildung 6). Die Auswertungen des Prüfstandbetriebes des EMiLE-Demonstrators mit einem starken und unregelmäßigen Anstieg der Halbleitertemperatur bestätigen die Ergebnisse der Zerlegung.



**Abbildung 7: Befestigungskonzept der Leistungshalbleiter in VERSE (© Bosch)**

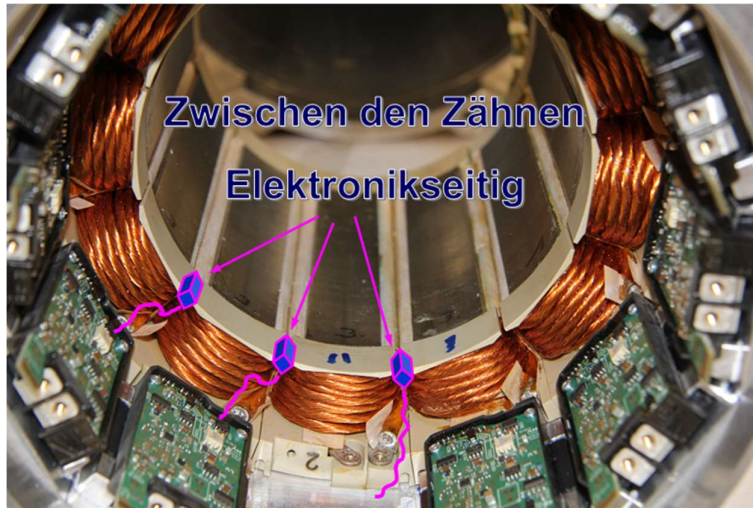
Abbildung 7 zeigt, dass bereits im ersten Prototypen des Einzelzahndemonstrators Fa. Bosch gemeinsam mit Fraunhofer IISB ein deutlich besseres Befestigungskonzept für die Halbleitermodule gewählt hat, als es im Projekt EMiLE der Fall war.

### 5.2.2 Festlegung und Bewertung geeigneter Regelkonzepte für eine dezentrale Regelung

Bei der Bewertung der ersten dezentralen Regelungskonzepte war vor allem das Fehlen eines zuverlässigen Konzeptes für eine dezentrale Rotorlageerfassung für das VERSE-Konzept auffällig. Im EMiLE-Projekt war hier noch ein zentraler Rotorlagegeber verwendet worden, der seine ermittelte Position an alle Einzelzähne auf dem Kommunikationsweg mitgeteilt hat. Dieses Konzept steht im Widerspruch zur Autonomie der Einzelzähne. Ein solcher Rotorlagegeber weist auch keine Redundanz auf und ist daher auch sicherheitstechnisch kritisch anzusehen.

Alternativ zu einer zentralen Positionserfassung wurden alternative Konzepte erarbeitet und bewertet. Federführend bei dieser Diskussion hat der Projektpartner AVL einige Lösungen vorgeschlagen, die im weiteren Projektverlauf an einigen Teildemonstratoren getestet wurden.

Eins der vielversprechenden Konzepte ist dabei die Verwendung von analogen Hall-Sensoren, die sehr ähnlich einem SIN-/COS-Geber analoge Sinus- und Cosinus-Signale abhängig von der Position der Permanentmagnete erzeugen können. Die Volkswagen AG hatte bei der Analyse des EMiLE-Antriebs eine mögliche Platzierung der Hall-Sensoren zwischen den Zähnen identifiziert und vorgeschlagen (s. Abbildung 8).



**Abbildung 8: Mögliche Platzierung der Hall-Sensoren zur dezentralen Positionserfassung**

Für die Bewertung der Regelungskonzepte im Projekt VERSE spielt die Modellierung der Elektromaschine eine entscheidende Rolle. Die Auslegung der Elektromaschine im Projekt VERSE wurde maßgeblich vom Partner SIEMENS durchgeführt. Allerdings benötigt die Entwicklung geeigneter Regelungskonzepte einen tieferen Einblick in die Zusammenhänge der Strom- und Induktivitätsverläufe, die durch eine übliche FEM-Auslegung der Maschine allein nicht zu gewinnen sind. Aus diesem Grund hat ISEA RWTH Aachen ihre eigene FEM-basierte Modellierung der Elektromaschine im Projektrahmen erstellt, die auch in zwei Veröffentlichungen [1] und [2] publiziert wurde.

Die Volkswagen AG konnte zu dem Zeitpunkt Erfahrungen bei der Auslegung und Regelung multiphasiger Maschinenkonzepte (aus einigen internen Projekten und dem BMBF-Förderprojekt HoskA) einbringen. Die verfolgten Lösungsansätze der RWTH Aachen entsprachen der üblichen Methodik für solche Fragestellungen und wurden dem entsprechend weiterverfolgt und konnten schließlich zum Projektabschluss auch entsprechend bestätigt werden.

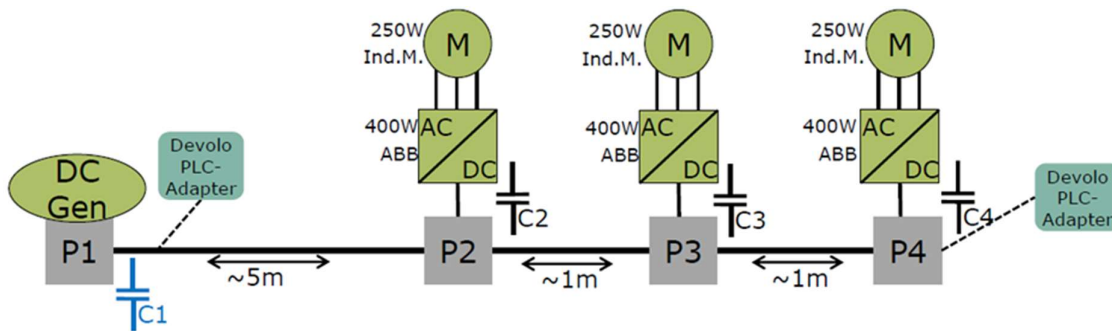
### 5.2.3 Konzeption einer automotive-geeigneten Kommunikation

Mögliche Kommunikationskonzepte wurden vom Projektpartner AiX-Control erarbeitet und geeignete Hardware-Konzepte zur verteilten Kommunikation vorgeschlagen. Unter Beteiligung der Volkswagen AG wurde eine Auswahl dieser Konzepte eingehender untersucht. Die Projektpartner im Konsortium haben sich darauf geeinigt, dass für die verteilte Regelung im VERSE-Projekt folgende Kommunikationsarten betrachtet und bewertet werden sollten:

- EtherCAT
- Powerline Communication
- FlexRay / CAN / ModBus
- Funkübertragung 868 MHz / 2.4 GHz

Die netzwerkbasierte EtherCAT-Lösung ist aus Sicht der Echtzeitfähigkeit, Bandbreite und Unempfindlichkeit gegenüber äußerer EMV-Störungen vielversprechend, erfordert aber einen hohen Aufwand in der technischen Umsetzung. Die Bus-basierten Lösungen sind aus der Sicht aller Partner

die grundsätzlich stabilsten, die erforderliche Bandbreite und die Echtzeitfähigkeit wurden jedoch kritisch gesehen. Die Betrachtung der Funkübertragung wurde zugunsten der anderer Konzepte relativ früh verworfen, da man bei dem Konzept mit den meisten Problemen hinsichtlich Echtzeitfähigkeit und Empfangsstörung in rauer EMV-Umgebung zu rechnen hat. Die Powerline-Lösung über den Traktionszwischenkreis wurde als hochinnovativ bewertet. Hierzu sollte im weiteren Projektverlauf ein Aufbau einer prototypischen Übertragungsstrecke aufgebaut werden, um einige Messungen an dem Testaufbau zur eingehenderen Bewertung durchführen zu können.



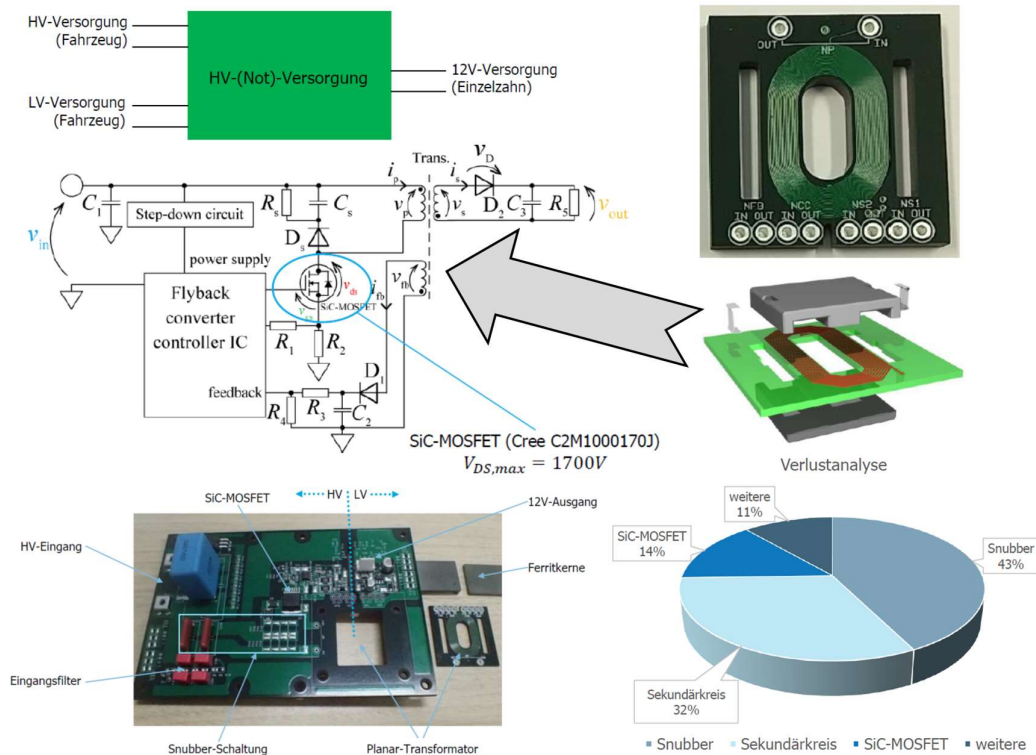
**Abbildung 9: Aufbau zum Test der Powerline-Kommunikation (© AixControl)**

Abbildung 9 zeigt diesen Testaufbau des Partners Aix-Control. Zum Einsatz kam ein käuflicher Powerline Adapter von Delovo, die raue EMV-Umgebung wurde durch entsprechende Elektromaschinen und Wechselrichter am Zwischenkreis simuliert. Wie in Abschnitt 5.5 näher berichtet: auch die Powerline-Kommunikation hat sich nicht bewährt und die Vernetzung über EtherCAT erschien ein sinnvoller Startpunkt für die weitere Erforschung eines hochvernetzten Systems zu sein.

#### 5.2.4 Konzeptbewertung der autonomen Spannungsversorgungseinheit

Die Entwicklung einer autonomen Spannungseinheit liegt im Projekt VERSE beim Partner ZF. Im Unterschied zum Vorgängerprojekt EMiLE wurde beim Projekt VERSE eine Priorität auf die Entwicklung einer vollkommen autonomen und redundanten Versorgung des Einzelzahns gelegt. In der frühen Konzeptionsphase wurde von der Volkswagen AG die Notwendigkeit der Redundanz der Versorgung sowohl aus dem LV- als auch aus dem HV-Kreis gefordert. Die Notwendigkeit dieser Redundanz ergibt sich aus den Sicherheitsanforderungen für Traktionsantriebe. Die Forderung nach einer autonomen Versorgung ergibt sich ebenfalls aus der Sicherheitsbetrachtung und ist vor allem dann relevant, wenn man die Redundanz der Zähne untereinander beim Ausfall der einzelnen Komponenten ausnutzen und potenziell für das Sicherheitskonzept automatisch fahrender Fahrzeuge einsetzen möchte, bei denen ein Passagier nicht mehr in die Technik eingreifen könnte und es notwendig wäre, zum Beispiel mit reduzierter Leistung weiter zu fahren.





**Abbildung 10: Autonome Spannungsversorgungseinheit (© ZF)**

Abbildung 10 zeigt die wesentlichen Merkmale der von ZF im Projekt entwickelten Spannungsversorgungseinheit. Zum Einsatz kommt eine Sperrwandler-Topologie, die für solche Anwendungen typisch und vollkommen ausreichend ist. Als Hauptschalter wird ein SiC MOSFET verwendet, was aus Sicht der allgemeinen Projektforschungsziele angemessen ist und einen Mehrwert in einer ganzseitliche Betrachtung der SiC-Technologie darstellt. Zwar kann in einer späteren seriennahen Realisierungsphase aus Kostengründen auf eine andere Technologie als SiC ausgewichen werden (z.B. die siliziumbasierte Cool-MOS™-Technologie von Infineon), für eine wissenschaftliche Betrachtung im Rahmen eines Förderprojektes spielt dies aber vorerst keine bedeutende Rolle.

Als innovativ wird von der Volkswagen AG der Einsatz einer planaren Transformator-Technologie bewertet. Grundsätzlich ist die planare Technologie an sich nicht neu und wurde u.a. auch vom Autor dieses Dokumentes bereits Anfang des Jahrtausends in diversen Projekten im Bereich der Stromversorgung erfolgreich eingesetzt (vgl. z.B. [3]), allerdings erlaubt der heute nicht übliche Einsatz eines planaren Transformators speziell in diesem Fall einige Vorteile bzgl. Platzerparnis, Kostenoptimierung und maschineller Fertigung der Baugruppe.

Das Tortendiagramm zur Verlustverteilung legt eine der hier gewählten Schaltungsauslegung auf Basis von Schottky-Dioden geschuldete Schwäche offen, indem noch relativ hohe Verlusten im Sekundärkreis auftreten. Dies lässt sich bei einer möglichen Umsetzung für Serie durch eine optimierte Auslegung mit Verwendung von Synchrongleichrichtern noch leicht beheben. (vgl. [3], [4], [5]). Synchrongleichrichter gehören mittlerweile zum Stand der Technik und werden bei den Stromversorgungen mit Ausgangsspannungen < 30 V flächendeckend eingesetzt.

### 5.3 Systemkonzepte, Bewertung der Technologie

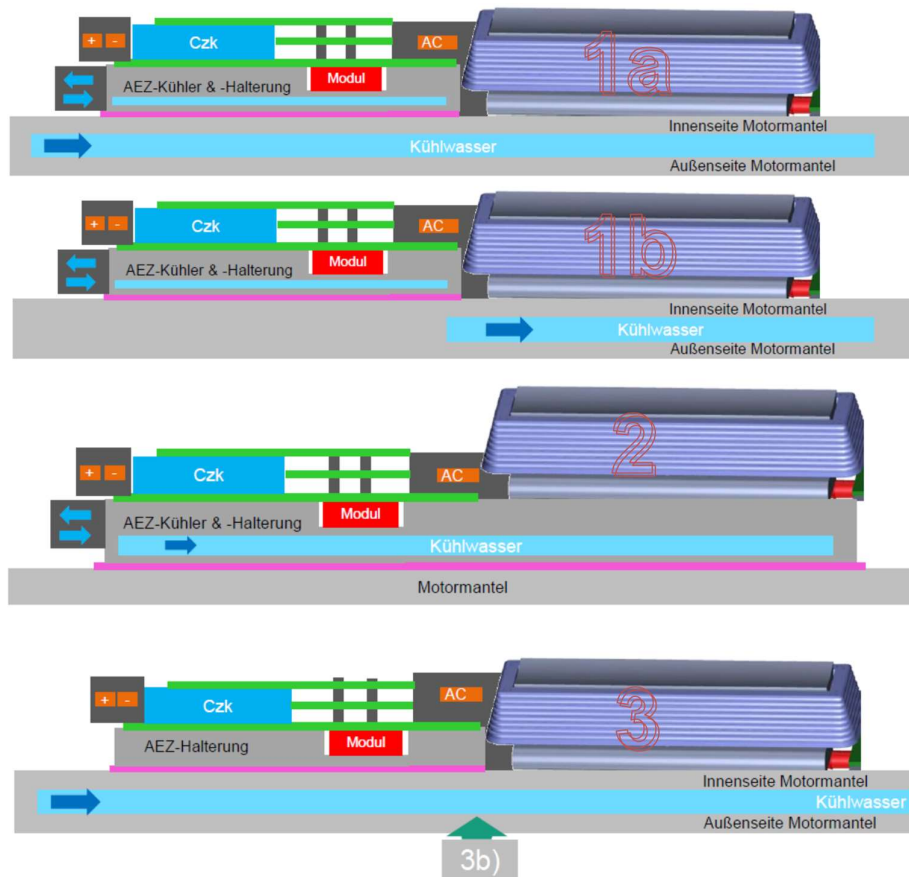
Über die schon erwähnte Analyse eines EMiLE-Antriebs wurde eine systematische Betrachtung des dort entstandenen Konzeptes durchgeführt, verbunden mit einer gezielten Analyse von Schwachstellen und den Möglichkeiten ihrer Beseitigung. Hierdurch wurde eine Bewertungsgrundlage für die mechatronische Optimierung im VERSE-Projekt geschaffen. Der von Volkswagen hierzu zerlegte EMiLE-Antrieb ist in Abbildung 11 dargestellt. Zu den erkannten Schwachstellen gehört z.B. die Anpressung der Halbleitermodule, ein relativ komplizierter Zusammenbau und eine Verklebung der Einzelzahnspulen mit dem Statorgehäuse.



**Abbildung 11: Zerlegter EMiLE-Antrieb**

Darauf aufbauend wurde im Projektkonsortium die prinzipielle mechatronische Anordnung im Einzelzahnaufbau konzeptionell untersucht und bewertet.

Zum direkten Vergleich wurden dazu fünf unterschiedliche Konzepte vorgeschlagen, die sich von der Anordnung der Bauteile in zwei große Gruppen aufteilen lassen. Die Konzepte 1-3 (s. Abbildung 12) vertreten dabei eine axial angeordnete Variante der Elektronik auf und unterscheiden sich nur geringfügig vom ersten Prototypen der Elektronik (vgl. Abbildung 15). Die Volkswagen AG hat diese Konzepte aufgrund ihrer übermäßigen Gesamtlänge des Antriebes negativ bewertet. Für einen PKW-Traktionsantrieb sind diese Konzepte daher als nicht zielführend eingeschätzt worden, was allerdings ihre mögliche Anwendung in anderen Bereichen (z.B. Busse, LKWs, etc.) nicht ausschließt.



**Abbildung 12: Drei längliche Varianten der Integration der Zahnelektronik (© Fraunhofer IISB)**

Hingegen wird bei den Konzepten 4-5 eine andere Anordnung der Elektronik vorgeschlagen (s. Abbildung 13). Diese „gestapelte“ Anordnung ist mit gewissen Aufwänden und Risiken beim Design und beim Aufbau verbunden, bietet jedoch die Möglichkeit, die Gesamtlänge des Antriebes kürzer zu halten. Zwar ist das mit einem Zuwachs des Durchmessers der Gesamtanordnung verbunden, jedoch entsprechen die beiden Varianten von ihrer äußeren Form eher dem heutigen Antrieb eines Elektrofahrzeugs und sind somit aus der Sicht der Volkswagen AG mit gewissen Einschränkungen akzeptabel. Aufgrund bleibender Kollisionen mit anderen Komponenten im heutigen Fahrzeugpackage wurden diese beiden Varianten von der Volkswagen AG als „neutral“ bewertet. Der Unterschied zwischen den beiden Konzepten besteht in der Anbindung des Halbleitermoduls an das Kühlsystem. Das vierte Konzept sieht eine Pin-Fin-Kühlung der Module vor. Im fünften Konzept wird das Halbleitermodul hingegen zunächst mit der Einzelzahn(AEZ)-Halterung (ohne Pin-Fin) verbunden. Diese Halterung nimmt die Wärme des Moduls auf und leitet sie breitflächig an den Hauptkühler weiter.

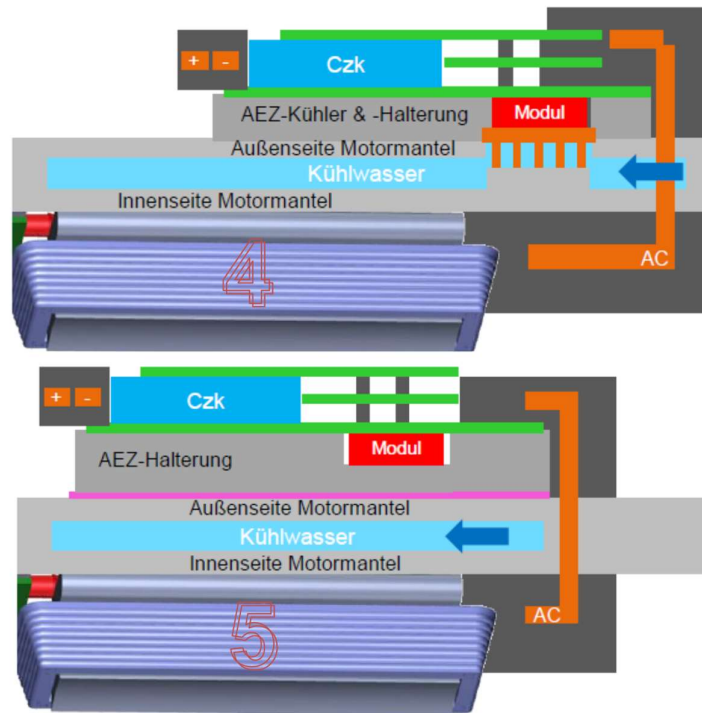


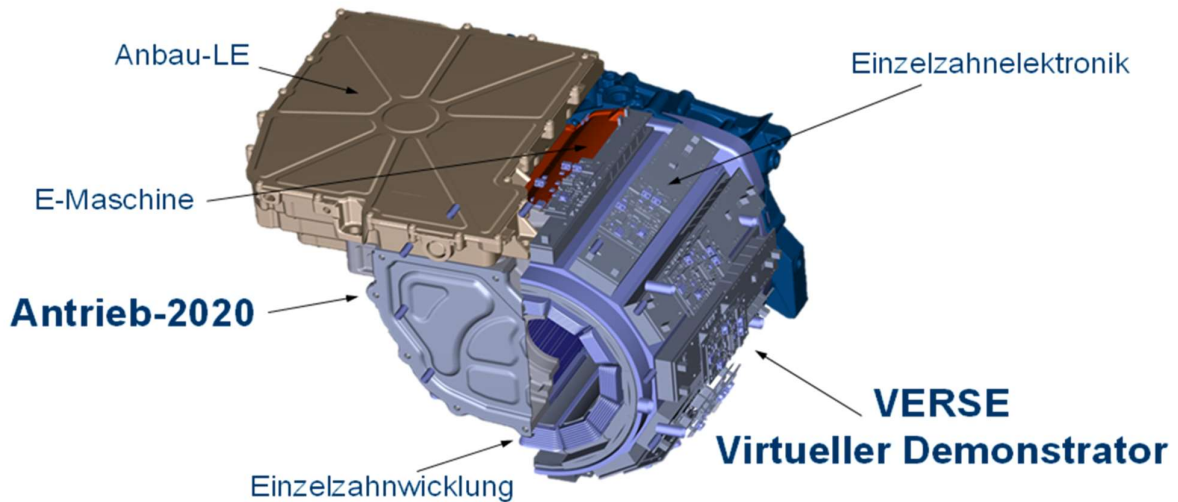
Abbildung 13: Zwei weitere Varianten der Integration der Zahnelektronik (© Fraunhofer IISB)

Abbildung 14 zeigt die resultierende Bewertungsmatrix für alle Konzepte. Die Bewertung der Volkswagen AG ist in der vorletzten Spalte der Tabelle rot eingetragen. Die Konzepte 4 und 5 erweisen sich hier als deutlich vorteilhafter als die Konzepte 1 bis 3.

Kühlkonzepte	Anzahl-Kühlkörper (2)	Anzahl-Dichtungen (2)	Komplexität der Kühlungsanbindung (2)	Kühlleistung (2)	Einbaukomplexität (2)	Schnittstellen (1)	Zusätzl. Gehäuse (1)	Außendurchmesser (1)	Länge des Motors (1)	Zusätzl. Bauteile (1)	Thermische Entkopplung Zahnspule / Elektronik (2)	Kühlwasserdurchfluss und -druck	EMV (2)*	Realisierbarkeit „Golf 2020“ (3)**	Punktzahl
1) Tauschbare Elektronik	-1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	0	1	-1			-1	-5
2) Echtes Gleichteilkonzept	-1	-1	-1	1	1	0	1	1	0	1	-1			-1	-1
3) Zentrale Entwärmung	1	1	-1	0	-1	-1	1	1	0	1	-1			-1	4
4) Bosch Elektronik außen Pin Fin	1	0	1	1	0	0	-1	0	1	0	1			0	8
5) Bosch / IISB Elektronik außen	1	1	1	0	0	1	-1	0	1	0	1			0	9

Abbildung 14: Bewertungsmatrix der Integration der Zahnelektronik

In der weiteren konzeptionellen Betrachtung wurde der 5. Vorschlag als der mit der höchsten Punktzahl weiterverfolgt, auch wenn damit die grundsätzlichen Anforderungen zum Package nicht erfüllt werden können. Dies zeigte sich letztlich in der Gesamtantriebsbewertung des virtuellen Demonstrators der sich aus zwölf Einzelzähnen zusammensetzt.



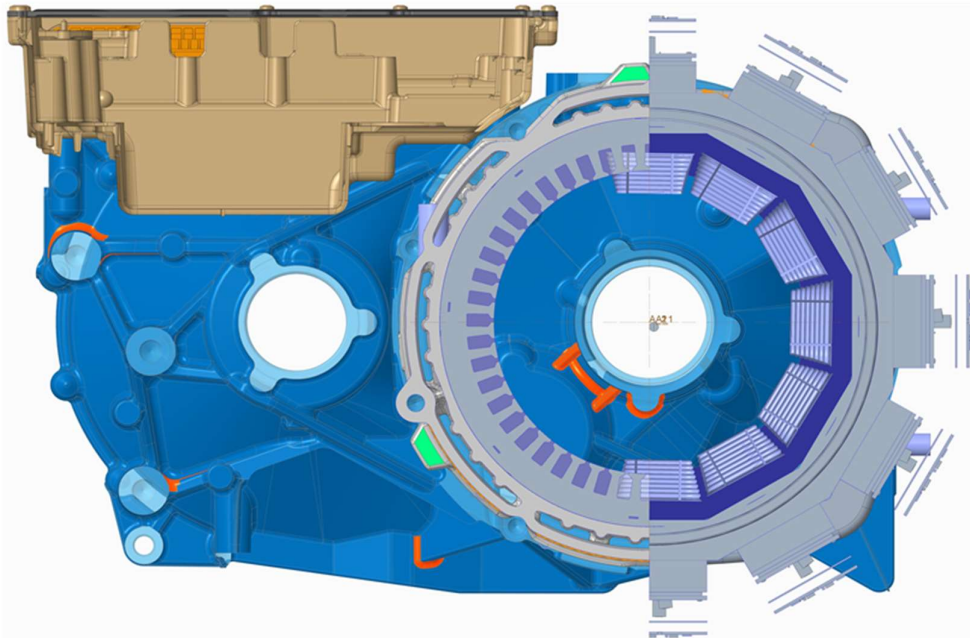
**Abbildung 15: Übersichtsdarstellung zum Vergleich zwischen Antrieb-2020 und VERSE**

Die Volkswagen AG hat dazu einen Vergleich zwischen dem Antrieb-2020 und dem virtuellen VERSE-Antrieb durchgeführt. In Abbildung 15 ist hierzu eine Übersichtsdarstellung zu sehen. Folgende Kernpunkte zeigt der Vergleich:

- Die Länge des VERSE-Antriebs entspricht in etwa der Länge des Antrieb-2020
- Der Durchmesser des VERSE-Antriebs ist aufgrund der außen liegenden Elektronik deutlich größer als der des Antrieb-2020 und führt zur Kollision mit der Gelenkwelle und der Durchdringung der Bodengrenzlinie im Fahrzeug
- Die Länge der E-Maschine des Antrieb-2020 ist nur unwesentlich länger, als die Länge der VERSE-Einzelzahnspulen

Aufgrund der Mobilitätswende ist die Entwicklung der elektrischen Antriebe bei der Volkswagen AG massiv beschleunigt worden und so wurden selbst die als optimistisch angesehenen Performance-Angaben, die noch zu Beginn des VERSE-Projekts als Ziel gesetzt waren, übertroffen. Daher hat die Volkswagen AG den Projektpartnern im Projektverlauf empfohlen, zu prüfen, ob eine Performance-Steigerung beim VERSE-Antrieb möglich wäre, um mit dem virtuellen Demonstrator zumindest die Kenndaten des aktuellen ID.3-Antriebes zu erreichen.

Abbildung 16 zeigt den Vergleich der Stator-Blechschnitte beider Antriebe. Es ist zu erkennen, dass der Serienantrieb aufgrund seiner verteilten Wicklung einen deutlich feineren Blechschnitt besitzt. Durch einen größeren Innendurchmesser des Stators können höhere Drehmomente mit dem Serienantrieb leichter dargestellt werden, als es mit dem VERSE-Antrieb mit seinen kleineren Durchmessern der Fall wäre.



**Abbildung 16: Systemvergleich – Durchmesser und Blechschnitt**

Im Ergebnis ließen sich die Performancedaten des heutigen Serienantriebes mit dem VERSE-Antrieb nicht erreichen. Zum einen sind die aktiven Durchmesser der Maschine zu gering und zum anderen ist die Integration der Elektronik bei weitem nicht von ausreichender Tiefe und Kompaktheit für eine Kompensation des erforderlichen Antriebsdurchmessers. In diesem Bereich gibt es weiter erheblichen Innovationsbedarf, um die immer komplexeren Anforderungen und Funktionen in kompakter Bauform integrieren zu können.

#### 5.4 Kommunikation und Regelung

In Abweichung zur ursprünglichen Planung konnten einige Arbeiten zu Kommunikation und Regelung nicht bei der Volkswagen AG ausgeführt werden. An dieser Stelle wird auf den Projektpartner ISEA RWTH Aachen verwiesen, der die Umfänge zum Teil übernommen hat. Die Ergebnisse zu Kommunikation und Regelung sind dort erst nach Abschluss des hier berichteten Teilprojektes erzielt worden, so dass dazu auf den Bericht des ISEAs verwiesen wird.

An dieser Stelle sei ein herzliches Dankeschön an das Team des ISEAs formuliert, da der hohe Arbeitseinsatz und die hohe Motivation dort die notwendig gewordene Umplanung kompensiert wurden und die Gesamtprojektziele dennoch erreicht werden konnten.

#### 5.5 Validierung

Da die Validierungsphase naturgemäß am Projektende ihren Schwerpunkt hat und die Volkswagen AG die Projektlaufzeit nicht mit den übrigen Partnern verlängert hat, konnten die hier gemäß Planung ursprünglich hierzu vorgesehenen Punkte nicht mehr voll umfänglich bis zum Gesamtprojektende begleitet werden. Die bis zum Projektabschluss von Volkswagen durchgeführten Validierungen in Bezug auf die Vernetzung, zeigten jedoch keine grundsätzlichen Schwächen der Systeme. Ein Teil der neuen Vernetzungsansätze erscheint für den Einsatz im Kraftfahrzeug zukunftsfähig, andere jedoch nicht.

Die Betrachtung der Funkübertragung wurde zugunsten der anderer Konzepte relativ früh verworfen, da man bei dem Konzept mit den meisten Problemen hinsichtlich Echtzeitfähigkeit und Empfangsstörung in rauer EMV-Umgebung zu rechnen hat.

Der Powerline Ansatz scheint nur mit deutlichem Aufwand stabil betreibbar zu sein und wurde daher für das Projekt verworfen. Die Messergebnisse am Testaufbau haben gezeigt, dass eine stabile Datenübertragung mit herkömmlichen Powerline-Adaptoren nur mit einer langsamen Datenrate möglich ist. Somit ist die Powerline-Übertragung nach dem heutigen Stand der Technik für die Hauptkommunikation zwischen den Einzelzähnen in VERSE ungeeignet. Eine Neuauslegung des Powerline-Adapters und seine Anpassung an die Traktionsnetze im Fahrzeug, könnte aus Sicht der Volkswagen AG eine deutliche Steigerung der Datenrate bringen, ein klarer Nutzen im Vergleich zu den anderen, robusteren Systemen ist damit aber nicht sichergestellt.

Im Rahmen des Projektes wurde das Thema Wicklungsisolation bearbeitet und es wurde hierzu sogar ein spezielles Verfahren entwickelt mit dem Teilentladungsmessungen während des Betriebs am Prüfstand ermittelt werden können. Es zeigt sich, dass die spezielle Bauform der Einzelzahnwicklung keine spezielle Herausforderung darstellt, wohl hingegen die hohe Schaltgeschwindigkeit der SiC-Bauelemente. Die Messungen zur Isolationsfestigkeit wurden von vom Partner Lenze durchgeführt und decken sich mit Analysen, die die Volkswagen AG parallel zu diesem Projekt erarbeitet hat [6.]. Das Isolationssystem der Elektromaschine – nicht explizit die in VERSE angesetzte Geometrie – zeigt Schwächen in der Dauerhaltbarkeit, wenn die Anstiegsgeschwindigkeiten der Spannung sehr hoch werden. Es deuten sich weitere Abhängigkeiten an von Temperatur, Fertigungsverfahren und – natürlich – vom Isolationssystem und -material selber an. Ddetailliertere Untersuchungen hierzu konnten im Projektrahmen nicht mehr durchgeführt werden.

## 6 Verwertbarkeit und Nutzen der Ergebnisse

Im Rahmen des Vorhabens ist ein Konzept erarbeitet worden, welches eine Leistungsskalierung mit Hilfe vollintegrierter autonomer Einzelzahnmodule mit SiC Halbleiterbauelementen ermöglicht. Basis hierfür ist die Skalierung der Leistung über die Anzahl der Module, die im Antriebsstrang jeweils Verwendung finden. Ein wirtschaftliches Ziel in dem Projekt war es, die Skaleneffekte für eine Kostenreduktion erschließen zu können, denn ein Einzelzahnmodul ist bereits in jedem Fahrzeug mindestens 12- bis 18-fach verbaut und damit ergibt sich auf Bauteilebene ein Skaleneffekt.

Die Energiewende und die damit verbundene Mobilitätswende hat diesen Grundgedanken seit Projektantragsphase jedoch ein Stück weit überholt, da die hohen Stückzahlen der Elektrofahrzeuge heute Realität sind und die Skaleneffekte nicht mehr durch die Skaleneffekte von Bauteilen erreicht werden müssen. Der Ansatz könnte aber für zukünftige Fahrzeuge mit einsatzbedingt niedrigen Stückzahlen nochmal von Interesse werden.

Im Projektrahmen konnten die definierten Potentiale bezogen auf die Technologieschwerpunkte

- Niederinduktives Leistungsmodul (sowie Kommutierungskreis)
- Verlustreduktion und Effizienzsteigerung durch den Einsatz von SiC-Technologie
- Paralleler Betrieb modul-integrierter und niederinduktiv angebundener Zwischenkreis-kondensatoren
- Skalierbarkeit und Integration einer Umrichter-Architektur
- Vorteilhafte Eigenschaften mehrphasiger E-Maschinen

untersucht und nachgewiesen werden. Es sei dazu auf die Schlussberichte der Partner verwiesen. Damit stehen erforderliche Bewertungsgrundlagen und ein Technologiebaukasten für eine mögliche Umsetzung in zukünftigen Serienprodukten grundsätzlich zu Verfügung.

## 7 Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Aktuell sind keine Ergebnisse dritter bekannt, die im Wettbewerb zu den hier erzielten Ergebnissen stünden.

## 8 Veröffentlichungen, Literatur

- [1] R. H. Loewenherz, V. Grau und R. W. De Doncker, „Modeling and control challenges of fully integrated modular electrical drives composed of smart stator modules,“ *The 10th International Conference on Power Electronics, Machines and Drives, PEMD, 2020*.
- [2] R. H. Loewenherz, S. Koschik, M. Kruse und R. W. De Doncker, „Modeling of Modular Multi-Phase Machines,“ *International Conference on Electrical Machines and Systems ICEMS, 2020*.
- [3] H. Wetzel, A. Siegel, H. Njiende, N. Fröhleke und J. Böcker, „Low Voltage Asymmetrical Half-Bridge Converter with Integrated Magnetics,“ *11th International Power Electronics and Motion Control Conferences, EPE-PEMC, Riga, Latvia, September 2004*.
- [4] H. Wetzel, N. Fröhleke, F. Meier und P. Ide, „Comparison of Low Voltage topologies for Voltage Regulator Modules,“ *Industrial Application Society Conference, Pittsburgh, USA, 2002*.
- [5] H. Wetzel, N. Fröhleke, J. Böcker und P. Ide, „High Efficient 3kW Three-Stage Power Supply,“ *Applied Power Electronics Conference, Dallas, USA, Februar 2006*.
- [6] K. Bae *et al.*, "Current State and Development Trends of Insulation Systems in BEV Traction Motors Steered by Electric Powertrain Innovation," *PCIM Europe digital days 2021; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management, 2021*, pp. 1-8.
- [7] Antlitz, Dr. A., "NEW AUTO – Mobility for Generations to Come", Volkswagen Konzern, <https://www.volkswagenag.com/de/InvestorRelations/presentations/2021.html>, 29.07.21

## 9 Verwendete Quellen

- [1] P. Bockerhoff, Y. Burkhardt, K. Egger and H. Rauh, "Highly integrated drivetrain solution: Integration of motor, inverter and gearing," *2014 4th International Electric Drives Production Conference (EDPC)*, 2014, pp. 1-6, doi: 10.1109/EDPC.2014.6984412.