

Forschungsagenda Korrosion:

"Robustheit gegenüber Klima in der Elektrotechnik/Elektronik"

von GfKORR – Gesellschaft für Korrosionsschutz e. V., DVS – Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e. V., ECPE European Center for Power Electronics e. V.

Positionspapier des GfKORR AK „Korrosion und Korrosionsschutz in der Elektronik“ und des DVS FA10 „Mikroverbindungstechnik“ sowie des ECPE

Zusammenfassung:

Die Gesellschaft steht unter dem Einfluss der globalen Megatrends Klimawandel/Ressourcenknappheit, Verschiebung der Wirtschaftsmächte, Verstädterung, demographischer Wandel und Digitalisierung. Um diesen Änderungen erfolgreich zu begegnen und sie sogar positiv zu gestalten wird Leistungselektronik in allen gesellschaftlichen Feldern zum Einsatz kommen (müssen). Um den damit einhergehenden gesteigerten Anforderungen an die Robustheit und Zuverlässigkeit der leistungselektronischen Komponenten zu begegnen, ist ein umfassendes Wissen bezüglich deren Korrosionsverhalten notwendig. Allerdings sind Korrosionsmechanismen hoch komplex. Sie sind vom Werkstoff, der Umgebung und den jeweiligen Schutzmaßnahmen abhängig. Entsprechend müssen dringend Bestrebungen in den verschiedensten Forschungsfeldern aufgenommen werden, um eine umfassende und abgesicherte Datenlage zu schaffen.

In Zukunft wird die Gesellschaft aufgrund von **5 globalen Megatrends** Änderungen durchlaufen.

- **Klimawandel und Ressourcenknappheit**

Leistungselektronik kann durch ihre Integration in Photovoltaik und Windenergie den gesteigerten Konsum der begrenzten natürlichen Ressourcen und die resultierende, gesteigerte Emission von Treibhausgasen dämpfen. Leistungselektronik ermöglicht weiterhin die Stabilisierung und die Kapazitätserweiterung der bestehenden Stromnetze. Bei der Entwicklung von Systemen zur alternativen Energiegewinnung, Transport, Nutzung und Speicherung (inkl. Batterie- und Brennstoffzellentechnik und Wasserstoffwirtschaft) wird Leistungselektronik in Bezug auf Nachhaltigkeit und Ressourcenschonung eine Schlüsselrolle spielen.

Durch Miniaturisierung lassen sich Systeme wie sogenannte Wearables also am Körper und in der Kleidung tragbare Elektronik um Leistungselektronik erweitern, wo es bisher nicht denkbar war. So lässt sich schließlich eine voll elektrifizierte Gesellschaft auf Basis erneuerbarer Energien bilden. Aber auch im Einsatz als Umweltmesstechnik zur Langzeitbeobachtung von Meeres- und Klimaveränderungen ist Leistungselektronik nicht wegzudenken.

- **Verschiebung der Wirtschaftsmächte**

Die Wirtschaftsmacht verschiebt sich von West nach Ost. Dementsprechend verändern sich die Anforderungen an die Leistungselektronikindustrie und die Forschung in Europa und insbesondere in Deutschland. Um weiterhin wettbewerbsfähig zu sein, müssen Deutschland und Europa den derzeitigen Vorsprung bei hochzuverlässiger Leistungselektronik halten und ausbauen. Hierbei steht neben der Temperatur-Zyklus-Beanspruchung die Korrosionsforschung einschließlich der Entwicklung entsprechender Lebensdauermodelle im Fokus. Weiterhin geht es darum, Spezialanwendungen mit KMU-Relevanz und hoher Wertschöpfung z.B. in den Bereich der alternativen Antriebskonzepte und im medizinischen Sektor zu erschließen.

- **Verstädterung**
Bis 2030 ist zu erwarten, dass 60 Prozent der Weltbevölkerung in Städten leben wird. Leistungselektronik kann einen Beitrag liefern zur Etablierung von smart buildings, elektrischer und autonomer Mobilität auf der Straße, auf den Schienen, auf dem Wasser und in der Luft sowie zur intelligenten Logistik unserer Güter.
- **Demographischer Wandel**
Eine alternde Gesellschaft hat Konsequenzen für den medizinischen Sektor, das Rentensystem, die Arbeitswelt und das Kaufverhalten. Leistungselektronik ermöglicht dabei die Entwicklung und Etablierung von Service- und Pflege-Robotern sowie von Elektrokleinstfahrzeugen für eine verlängerte eigenständige Mobilität zur Entlastung des Pflegesystems.
- **Digitalisierung und Konnektivität**
Digitalisierung bewirkt hohe Datenmengen bei der Nutzung von Cloud Diensten, künstlicher Intelligenz oder beim sich etablierenden 3D Druck in der industriellen Produktion. Dafür sind selbstlernende Systeme und Automatisierungsprozesse sowie Industrie 4.0 notwendig. Dies erfordert hoch-effiziente Stromquellen und Energiespeicher und deren Managementsysteme also zuverlässige Leistungselektronik.

Elektronische Systeme werden damit zukünftig in der Gesellschaft omnipräsent sein. Entsprechend steigen die Anforderungen an die Ressourcen schonende Herstellung und die Feuchterobustheit also Zuverlässigkeit im Einsatz. Durch die Verbesserung der Korrosionsbeständigkeit und des Korrosionsschutzes entsteht eine doppelte Wirkung hinsichtlich Nachhaltigkeit. Die Nutzungsdauer der Leistungselektronik erhöht sich, wodurch Ressourcen geschont werden. Außerdem können Leistungselektroniksysteme unter rauerer Klimabedingungen eingesetzt werden, wo bislang mechanische Lösungen genutzt wurden, wodurch Energie und Ressourcenverbrauch der Systeme ebenso verringert werden.

Was sind die größten Herausforderungen gegenwärtig und in den nächsten fünf Jahren?

Durch die gesteigerten Anforderungen an die Leistungselektronik wird die Korrosionsforschung im Bereich der Elektronik / Elektrotechnik eine zunehmende Rolle einnehmen müssen.

Neben Feuchte sind auch Schwefel, Chlor, Aminverbindungen, etc. aus der Atmosphäre für Korrosion von elektronischen Bauteilen verantwortlich. Neben bestückten Baugruppen der Elektronik werden auch Bauelemente und Leiterplatten wie Relais, Kabel, Stecker, etc. aus dem Bereich der Elektrotechnik von korrosiven Ausfällen betroffen sein.

So wird zum Beispiel bei den alternativen Energiekonzepten und der adäquaten Speicherung dieser nicht zum Verbrauchszeitpunkt erzeugten Energie die Wasserstoffwirtschaft eine entscheidende Rolle spielen. Hier werden in der anfänglichen Phase noch nicht abzuschätzende Anteile an Schadgasen auch den grünen Wasserstoff begleiten, die Korrosionsreaktionen begünstigen und damit ihrerseits die Nutzbarkeit bzw. die Lebensdauer der verwendeten Bauteile stark begrenzen. Gerade hier sind aber auch lange und vor allem zuverlässige Laufzeiten notwendig, um einen anwendungstechnischen Mehrwert zu schaffen.

Im Anwendungsbereich Elektromobilität wird sich voraussichtlich eine höhere Feuchtebelastung auf die elektronischen Komponenten ergeben. Dies wird verursacht durch die Verringerung der Abwärmekollektive im Betrieb infolge des fehlenden Verbrenners. Die Elektromobilität muss also sowohl rauen Einsatzbedingungen als auch der Forderung nach minimalem Gewicht und Bauraum nachkommen.

Welchen Nutzen hat dies für Wirtschaft und Gesellschaft?

Im Bereich der Leistungselektronik ist Deutschland derzeit eine der führenden Nationen. Um diese Position zu halten, ist es wichtig, die Komponenten der Leistungselektronik (insbesondere Halbleiterbauelemente wie Si-IGBTs oder SiC-MOSFETs) optimal elektrisch auszunutzen. Dies steigert allerdings die Betriebsbelastungen und elektrische Empfindlichkeit der Module. Durch einen verbesserten Korrosionsschutz und damit minimierte Leckströme kann hier ausgeglichen werden.

Bei LED-basierten Beleuchtungslösungen müssen die Silberverbindungen effektiv gegen Schädgaskorrosion geschützt werden, damit die erhofften Einsparungen durch eine signifikante Lebensdauererhöhung und Wartungsminimierung wirklich erzielt werden können.

Die anstehende Modernisierung der Bahn von der Strecke bis zum smarten Güterwagen erfordert ebenfalls ein sehr guten Korrosionsschutz aufgrund der oft rauen Umgebungsbedingungen, um den wirtschaftlichen Nutzen durch beste Verfügbarkeit der Systeme auszuschöpfen. Insbesondere intelligente Gehäuselösungen werden hier eine zukünftige Schlüsselrolle spielen.

Die Entwicklung von korrosionsbeständigen Loten insbesondere gegen sogenannte elektrochemische Migration und verbesserten, massenfertigungsgerechten Thermotransfer-Spritzgussprozessen kann als ein Schlüssel zur Umsetzung im Feldeinsatz angesehen werden.

Korrosionsmechanismen sind hoch komplex. Ihnen liegen verschiedene Reaktionen und eine Vielzahl an Triebkräften und Degradation-begünstigenden Einflussfaktoren sowie deren nahezu unbegrenzte Kombinationen zugrunde. Entsprechend ist es notwendig Schnelltests für eine zuverlässige Indikation der Robustheit gegenüber eventuellen schädigenden Belastungen zu entwickeln. Genauso wichtig ist es, auch auf dem Gebiet der kombinierten Belastungstests Fortschritte zu machen, um die jeweiligen Korrosionsbeschleunigungsfaktoren, die sich aus unterschiedlich gearteten Umgebungsbedingungen ergeben, in ihrer Kombination besser bewerten und daraus zielführende Gegenmaßnahmen ableiten zu können.

Die analytische Herangehensweise der modernen Korrosionsforschung besteht in den folgenden Ansätzen:

- Charakterisieren und Verstehen von Korrosionsprozessen durch hochortsauflösende Methoden (Elektrochemie, Impedanzspektroskopie (EIS), Mikroskopie, Rasterelektronenmikroskopie mit Mikroanalytik) mit Fokus auf in-situ/operando Methoden (z.B. Kretschmannaufbau)
- Kopplung von Theorie und Experiment beim
 - beschleunigten Testen,
 - kombinierten korrosiv/thermomechanischen Belasten und
 - Ermitteln der Beschleunigungsfaktoren und deren Abhängigkeiten
- Korrelation von Elektronikfertigung und korrosionsfördernden Rückständen
- Korrelation von elektrischen Schäden und Korrosionsschäden
- Lebensdauermodellierung

Durch diese analytischen Ansätze können Mechanismen der Korrosion auch in komplexen Umgebungen aufgeklärt werden, was zur Vorhersagbarkeit von Korrosion und folglich deren Vermeidung beiträgt. Die Korrosionsforschung muss dabei Hand in Hand mit der Lot- und Schutzentwicklung sowie der Verbesserung des elektrischen Designs für robuste Elektronik erfolgen.

Was hat die Korrosionsforschung in den letzten zehn Jahren auf dem Gebiet der Leistungselektronik erreicht

Hinsichtlich des Verständnisses der Korrosionsanfälligkeit von Silber/Sinterverbindungen wurden durch das Verbundprojekt KorSikA große Fortschritte erzielt. Hinsichtlich der

Schutzoptimierung von Leistungselektronikmodulen gegen Feuchtebelastung wird das Thema aktuell u.a. durch das Verbundprojekt IsoGap weitergeführt.

Für die Risikobewertung nach Nacharbeit und Reparatur hinsichtlich Elektrochemischer Migration wurden im IGF Projekt N17960N/1 operative Handlungshinweise zur Vermeidung von Feuchte- bzw. Korrosionsausfällen für die Elektronikproduktion erarbeitet.

Das IGF Projekt 19715 BR zur Klebstoffdegradation hat vertiefte Einblicke und Erkenntnisse in die Alterung und damit Schutzwirkung von Epoxidsystemen erbracht, die beim Schutz von Elektronik genutzt werden. Speziell diese Form der Elektronik wird in hohen Stückzahlen produziert und vor allem für die Elektromobilität eingesetzt.

Das KMU-innovativ Verbundprojekt REWAKO 02WQ1464 hat zur Entwicklung von Schwachstellen-Sensoren für elektrische Anlagen geführt. Diese sollen vor allem in der Wasserwirtschaft als Korrosions-Frühwarnsysteme eingesetzt werden, um drohende Systemausfälle zu vermeiden.

Wo besteht weiterer Forschungsbedarf?

Um die zuverlässige Umsetzung der genannten gesellschaftlicher Ziele sowie eine erhöhte Nachhaltigkeit (Energieeinsparung, Ressourcenschonung, ...) durch Lebensdauererhöhung und Effizienzsteigerung zu erreichen, muss sich die Korrosionsforschung folgender Felder annehmen:

- Aluminium- und Kupferkorrosion auf Chipebene also der Einfluss von Feuchte und kleinster Verunreinigungen auf Leistungshalbleiter
- Korrosionsschutz der sog. Aluminium Garde Ringe durch Glas- bzw. Polymerpassivierungen, um die Sperrspannungen von Leistungshalbleitern stabil zu halten
- Voraussage von Korrosionsprozessen vor allem vom sog. Anodischen Migrationsphänomen (AMP) und der Elektrochemischen Migration in komplexen Umgebungen wie Windkraftanlagen, Bahnsystemen oder in der Elektromobilität
- Entwicklung und Verifikation von Schädigungsmodellen und deren Simulation
- Entwicklung von Schnelltests und kombinierten Belastungstests zur Verkürzung der Zuverlässigkeitsprüfungen, insbesondere im Schadgasbereich
- Entwicklung/Optimierung von hochvolt- und hochtemperaturbeständigen Korrosionsschutzsystemen
- Verbesserte smarte Gehäuse-Designlösungen zum Kondensations-/Korrosionsschutz zur Vermeidung teurer Schutzbeschichtungen, die das Recycling von Altbaugruppen behindern
- Entwicklung von Loten, die gegen Elektrochemische Migration beständig sind

Daraus ergeben sich vor allem folgende Forschungsthemen:

- Alterungsbeständigkeit von Schutzbeschichtungen, Verguss und Thermotransfermold
- Ausbau der Erkenntnisse zur Rolle von pergulierenden Netzwerken bei dem Anodischen Migrationsphänomen in Verguss bzw. Epoximoldcompound-Massen
- Entwicklung alternativer Hochvolt-Schutzsysteme wie Parylene für sog. Sandwich-Module, die kleinere und universeller einsetzbare Leistungselektronik ermöglichen
- Entwicklung von Ultradünnschicht-Coatings für kostengünstige Stecker und mechanische Komponenten, die derzeit nicht beschicht-/schützbar sind
- AMP-beständige Lötstopp und Schutzlacksysteme für feuchterobuste und alterungsbeständige Leistungselektronik
- Kosten- und zeitreduziertes Qualitätsmonitoring für Schadgas- und Feuchtebeständigkeit
- Erarbeitung von geeigneten Bewertungskriterien bezüglich der Feuchterobustheit bezogen auf die aktive Lebensdauer