1 Einleitung

Die Fahrzeugkarosserie muss eine Vielzahl von Fahrzeugfunktionen und Eigenschaften vereinen. Aerodynamik und Aeroakustik, Schwingungs- und Klimakomfort sowie aktive und passive Sicherheit sind dabei genauso wichtig wie der Korrosionsschutz. Aus der Komplexität der zu erfüllenden Funktionen ergeben sich Zielkonflikte, welchen es im Rahmen der Fahrzeugentwicklung bestmöglich zu entsprechen gilt.

Fahrzeuge und damit alle mechanischen und elektronischen Komponenten sind extremen Umgebungsbedingungen sowie den entsprechenden Wechseln derer ausgesetzt. [Vog99] Diese klimatischen Belastungen können in Kombination mit weiteren Einflussgrößen zu Korrosion an der Fahrzeugkarosserie sowie deren mechanischen und elektronischen Subsystemen und Komponenten führen.

Ein funktionaler Korrosionsschutz ist heute im Vergleich zu den 80er und 90er Jahren des 20. Jahrhunderts kein Kaufkriterium für Kraftfahrzeuge mehr, vielmehr wird ein wirkungsvoller Korrosionsschutz vom Kunden erwartet und vorausgesetzt. Nach wie vor stellt die Zuverlässigkeit eines Fahrzeuges das wichtigste Kaufargument für Kunden dar. [DAT16]

Gleichzeitig haben sich die Anforderungen im Bereich der Korrosionsabsicherung sowie das Nutzungsverhalten der Fahrzeugbesitzer verändert. Korrosion und Korrosionsschutz sind heute weniger ein Betriebsfestigkeitsthema, als vielmehr ein Kosten- und Imagethema. Es ist daher zwingend notwendig, die kostenintensiven Absicherungsmethoden sowie die aufwändigen, in das System Fahrzeug integrierten Schutzmechanismen weiter zu entwickeln und zu optimieren.

1.1 Motivation

Drei wichtige Trigger, welche die Weiterentwicklung der Korrosionsabsicherung und damit auch diese Arbeit motiviert haben, werden im Folgenden benannt und charakterisiert. Weiterentwicklungsbedarf für den Bereich der Korrosionsabsicherung bzw. der Gesamtfahrzeugabsicherung ergibt sich prozessorientiert im Bereich der Fahrzeugentwicklung, aus wissenschaftlichem Weiterentwicklungsbedarf sowie anhand von sich verändernden gesetzlichen und gesellschaftlichen Anforderungen.

Trigger 1: Prozessorientierte Herausforderungen – Produktkomplexität sowie Zeit- und Kostendruck erfordern Weiterentwicklung der Korrosionsabsicherung in der Automobilentwicklung

Korrosion ist im Sinne der Fahrzeugentwicklung in erster Linie ein Kosten- und Imagethema. In direktem Zusammenhang mit den Kosten stehen der Absicherungsaufwand, die

Entwicklungs- und Absicherungsdauer im Entwicklungsprozess sowie die angestrebte Schutzdauer, welche erreicht werden soll.

Im Bereich der Fahrzeugentwicklung ist es das Ziel der Automobilindustrie, eine möglichst zeit- und kosteneffiziente, hinreichend genaue und möglichst frühzeitige Aussage bezüglich des Korrosionsverhaltens treffen zu können.

Erreicht werden sollen diese Ziele einerseits durch Weiterentwicklung und Ergänzung der Simulation in komplexen, stationären Prüfumgebungen, welche die korrosionsklimatischen Belastungen zeitgerafft nachbilden [FR10], sowie andererseits durch Virtualisierung der Korrosionsprozesse anhand numerischer Simulationen. Aktuelle Beispiele für die komplexen Prüfumgebungen sind der Klimawindkanal der Daimler AG in Sindelfingen sowie das Energie- und Umwelttechnische Versuchszentrum (EVZ) der BMW Group in München [BMW15].

Im langfristigen Trend muss der Anteil prüftechnischer Simulationen gesenkt werden und durch leistungsfähige numerische Simulationen ersetzt werden. Neben den logistischen, zeitlichen und damit finanziellen Gründen sprechen auch technische Argumente für den zunehmenden Anteil von Simulationen. Der Trend der Derivatisierung, sich ändernde gesetzliche Vorgaben sowie die zunehmende Komplexität moderner Fahrzeuge (bspw. Materialkomplexität durch Mischbauweise) erhöhen den Absicherungsbedarf in der Fahrzeugentwicklung deutlich.

Mit der sich verändernden Gesellschaft verändern sich auch die Mobilität und die Mobilitätskonzepte. Diese neuen Konzepte sowie auch die zunehmende Systemkomplexität, beispielsweise im Bereich der E/E-Komponenten, führen zu Herausforderungen im Packaging, also dem Verhältnis zwischen Fahrzeuggröße und nutzbarem Raum des künftigen Fahrzeugs. Sensorik und Elektronik müssen verstärkt in Karosseriebereichen verbaut werden, in welchen sie Feuchtigkeit und dementsprechend einem erhöhten Korrosionsrisiko ausgesetzt sind. Die Anordnung von E/E-Komponenten im Bereich hoher (Luft)Feuchtigkeit kann eine verkürzte Lebensdauer bzw. den Ausfall der entsprechenden Systeme verursachen. [Sch99]

Zahlreiche Forschungsprojekte beschäftigen sich beispielsweise mit elektrochemischer Migration in Steuergeräten und elektronischen Bauteilen, für deren Auftreten klimatische Belastungen und Feuchtigkeit ausschlaggebend sind. [Ver15] [Mat16] [Zho13]

Um heutigen und zukünftigen Herausforderungen trotz sich verkürzender Entwicklungszeiten begegnen zu können, ist die Weiterentwicklung der Absicherungsprozesse zwingend notwendig. Eine wesentliche Grundvoraussetzung dafür sind ein umfangreiches Verständnis der Korrosionsprozesse sowie die detaillierte Kenntnis der komplexen korrosionsklimatischen Belastungen im Fahrzeug.

Trigger 2: Wissenschaftlicher Weiterentwicklungsbedarf – Fehlen leistungsfähiger Simulationstools auf Gesamtfahrzeugebene

Gegenstand der wissenschaftlichen Entwicklung ist in erster Linie die Etablierung von virtuellen Absicherungsmethoden, basierend auf numerischen Simulationen. Numerische Simulationen versprechen im Vergleich zu den heutigen prüfstandbasierten Simulationsmöglichkeiten einen deutlich früheren Erkenntnisgewinn hinsichtlich zu erwartender Korrosionsbelastung und sollen zu einer signifikanten Einsparung von Entwicklungszeit und Entwicklungskosten führen.

Anders als beispielsweise im Bereich der integralen Sicherheit, der entsprechenden Crash-Simulation oder auch der Fahrdynamik, sind die virtuellen Methoden im Bereich der Korrosionsabsicherung nur vergleichsweise rudimentär etabliert. Grund dafür ist in erster Linie die Komplexität des Korrosionsvorganges, welche sich aus der Vielzahl mechanischer, klimatischer und chemischer Einflussfaktoren herleitet. Professor Pidaparti beschreibt diese Situation ebenfalls und weist darauf hin, dass die heutigen Simulationsmethoden in Bezug auf Leistungs- und Aussagefähigkeit stark begrenzt sind und besonders bei komplexen Geometrien mit großer Ungenauigkeit behaftet sind. [Pid09]

Korrosion im automobilen Umfeld ist von einer Vielzahl mechanischer, klimatischer und chemischer Einflussfaktoren abhängig. Die stetige Interaktion dieser Einflussgrößen macht den Korrosionsprozess hochkomplex und nach heutigem Stand der Technik nicht annähernd vollumfänglich virtuell abbildbar. Neben den Herausforderungen der Prozesssimulation sind die virtuelle Abbildung der Mehrphasigkeit von Fluiden, der Phasenübergang sowie der enorme Aufwand bei Vernetzung und Berechnung weitere herausfordernde Faktoren, welche sich aus der Systemkomplexität des Gesamtfahrzeuges ergeben.

Ein zielführender Zwischenschritt bei der Virtualisierung des Korrosionsprozesses ist es, nicht die Korrosion als solche, sondern die Prozesse, welche zu Korrosion führen, zu simulieren und daraus entsprechende Korrosionsrisiken für einzelne Kleinklimate, Subsysteme und für das Gesamtfahrzeug abzuleiten. Beispiele hierfür sind die mittlerweile in der Fahrzeugentwicklung etablierte Simulation von Steinschlägen[Sch12] sowie die diversen akademischen Ansätze zur Simulation der mehrphasigen Feuchtigkeitsverteilung in Fahrzeugkarosserien. Am Lehrstuhl Kraftfahrzeugtechnik der Technischen Universität Dresden wurde ein multiskalierter Ansatz zur Abbildung der mehrphasigen Fluidverteilung im Gesamtfahrzeug entwickelt, dessen Ergebnisse und methodischen Herangehensweisen u.a. in der Dissertationsschrift von Hermsdorf dokumentiert sein werden. [Her16]

Ein weiterer Ansatz wird von Hellwig für die numerische Abbildung von Kondensationsvorgängen in Fahrzeugsteuergeräten beschrieben. Auch er arbeitet bei der numerischen Abbildung des Vorganges mit stark einschränkenden Randbedingungen und weist darauf hin, dass für eine vollständige Betrachtung die komplexe

strömungssimulatorische Abbildung des Feuchtigkeitstransportes berücksichtigt werden müsste. [Hel08]

Ein weiterer Zwischenschritt auf dem Weg zur Vorhersage der Korrosionsbelastung im realen Feldeinsatz ist die Erstellung von Datenbanken aus den vielfältigen, weltweit stattfindenden Korrosionsanalysen in Felduntersuchen an Materialcoupons und Gesamtfahrzeugen und die anschließende Interpolation mittels mathematischer Modelle. Mayrhofer beschreibt eine solche Methode des „Climatic Modelling". [May15] Ein ähnliches Vorgehen beschreibt Knoll für die Korrosionsprozesse an Abgasanlagen. [Kno16] In beiden Fällen sowie generell für ein datenbankbezogenes Vorgehen ist eine solide Parametrisierung der Datenbanken mit nutzungsnahen Felddaten notwendig.

Sowohl für die simulatorische Abbildung des Korrosionsprozesses bzw. von zu Korrosion führenden Belastungen als auch für die Bewertung der Korrosionsbelastung am Gesamtfahrzeug auf der Basis numerisch-mathematischer Modelle und Datenbanken ist eine umfangreiche Kenntnis der korrosionsklimatischen Belastungen notwendig.

Trigger 3: Gesellschaftlich und politisch motivierter Entwicklungsbedarf – Einfluss erhöhter Umweltanforderungen sowie Veränderung von Gesellschaft und Mobilität

Die Endlichkeit fossiler Kraftstoffe sowie der weltweit wachsende Bedarf an ihnen machen moderne, effiziente Antriebskonzepte und Fahrzeuge notwendig. Kraftstoffeinsparung und Verringerung von Emissionen sind wesentliche Treiber in der Fahrzeugentwicklung. Für die Fahrzeugkarosserie bedeutet das Leichtbau, neue Materialien und Werkstoffe sowie Kombination dieser in Mischbauweisen. Der Trend zur Elektromobilität und zu hybriden Antriebskonzepten erfordert andere Karosseriearchitekturen und Fahrzeugkonzepte. Der Einsatz von Verbundwerkstoffen, Aluminium, Magnesium und neuen Stahllegierungen führt zu sich verändernden Korrosionserscheinungen und -intensitäten. Globalisierung und Urbanisierung haben auch Einfluss auf Korrosionserscheinungen und die Korrosionsabsicherung. Weltweit herrschen stark variierende, korrosionsklimatische Bedingungen vor – moderne Fahrzeuge und deren Korrosionsschutz müssen ohne zusätzliche Maßnahmen in all diesen Regionen funktionieren. Diese Trends und die damit verbundenen Herausforderungen werden unter anderem von Stellnberger [Ste14] und Krömer [Krö16] beschrieben.

Um der Vielzahl der neuen Anforderungen zu entsprechen, müssen gegenwärtige, etablierte Schutzsysteme sowie die Methoden der Korrosionsabsicherung angepasst und konsequent weiterentwickelt werden.

Prozessbeeinflussend sind auch die steigenden Ansprüche im Bereich des Umweltschutzes, welche durch die entsprechende Gesetzgebung vorgegeben werden. Die seit 2000 geltende EU-Richtlinie 2000/53/EG [EU00] und die deutsche Anwendung als Altfahrzeugverordnung

führten mit dem Verbot von Giftstoffen wie Schwermetallen und Chrom-IV-Verbindungen zu nachhaltigen Veränderungen im Korrosionsschutz sowie im Absicherungsprozess. Entsprechend der Verordnung müssen Fahrzeuge annähernd vollständig recycelbar sein.

Ein weiteres Beispiel ist in diesem Zusammenhang das Verbot von Phosphat, einigen Nitriten und von Nickel, Materialien, die unter anderem im Bereich des Korrosionsschutzes, konkret im Lackaufbau, Verwendung finden. Neue Schutzmechanismen müssen entwickelt, getestet und hinsichtlich ihrer Wirkungsweise erforscht werden.

Ein aus wissenschaftlicher Sicht eher sekundärer, jedoch keinesfalls zu vernachlässigender Faktor in Bezug auf den Korrosionsschutz ist der jährliche marktwirtschaftliche Schaden, der durch Korrosion erzeugt wird. Eine Studie der World Corrosion Organization aus dem Jahr 2016 schätzt diesen Schaden auf bis zu 3,4% des jährlichen BIP von Industriestaaten. Für Deutschland bedeutet das für das Jahr 2016 rund 106,8 Milliarden US-Dollar. [NAC16]

1.2 Forschungsfrage und Zielstellung der Dissertation

Aus den in Kapitel 1.1 beschriebenen Motivationsansätzen und Triggerthemen der automobilen Korrosionsabsicherung leitet sich ein unmittelbarer Weiterentwicklungsbedarf ab. Generelles Ziel für einen zeit-, ressourcen- und kosteneffizienten Korrosionsschutz am Kraftfahrzeug ist ein detaillierter Erkenntnisgewinn in einer möglichst frühen Phase der Fahrzeugentwicklung. Die Verlagerung von Erkenntnissen, Entwicklungsentscheidungen und -tätigkeiten in eine frühe Entwicklungsphase wird als Frontloading bezeichnet. [Alb16]

Ein Frontloading des korrosionsklimatischen Erkenntnisgewinns konnte bisher vordergründig durch aufwändige stationäre und mobile prüftechnische Methoden am Gesamtfahrzeug, an Teilfahrzeugen und an Komponenten erreicht werden. Das Potenzial dieser Methoden stellt sich jedoch als weitestgehend ausgereizt dar.

Ähnlich wie in anderen automobiltechnischen Disziplinen wird virtuellen Methoden zur simulativen Abbildung sowohl von Korrosionsprozessen als auch von Korrosion beeinflussenden Parametern sehr großes Potential zugemessen.

Allen virtuellen Methoden ist dabei gemein, dass diese einerseits mit relevanten Daten parametrisiert werden müssen und andererseits die Simulationsergebnisse mit robusten Kennwerten validiert werden müssen. Dies gilt vor allem in der Entwicklungsphase virtueller Methoden, in welcher sich die meisten Tools zur Simulation von Korrosion bzw. von zu Korrosion führenden Belastungen befinden. Darüber hinaus gilt, dass Berechnungstools ein Systemverhalten nur dann ausreichend genau abbilden können, wenn die dahinterstehenden Wirkketten entsprechend verstanden sind.

Daraus lässt sich ableiten, dass ein detailliertes Verständnis der korrosionsklimatischen Belastungen sowie ein gründliches Wirkkettenverständnis zwingend notwendig sind, um virtuelle Methoden zu etablieren.

Für mich persönlich haben sich aus den gegebenen Randbedingungen die folgenden forschungsrelevanten Fragestellungen abgeleitet:

1. **Wie kann das Verständnis der korrosionsklimatischen Belastung und deren Wirkketten in einer Fahrzeugkarosserie detaillierter analysiert werden und wie lassen sich dabei Einflüsse durch Zeitraffung vermeiden?**

2. **Welches sind die relevanten Karosseriebereiche und Kleinklimate?**

3. **Wie kann ein weiteres Frontloading in der Korrosionsabsicherung ermöglicht werden und wie kann eine entsprechende Methodik aussehen?**

Zur Einordnung der Forschungsfrage sowie der vorliegenden Dissertation in das Wissenschaftsfeld wurde die Übersicht in Abbildung 1 erstellt.

Der für die Beantwortung der Forschungsfragen entwickelte Lösungsansatz ist im Anschluss an die Analyse der theoretischen Vorbetrachtung in Kapitel 2.4 detailliert beschrieben.

Aus der Übersicht in Abbildung 1 geht weiterhin hervor, welche Wirkketten und welche Einflussfaktoren zum zentralen Arbeitsgebiet der Dissertation gewählt wurden. Das Arbeitsgebiet sowie der durch diese Dissertation zu erzielende Beitrag zum allgemeinen Virtualisierungsbestreben sind in Abbildung 1 durch die rote Markierung hervorgehoben.

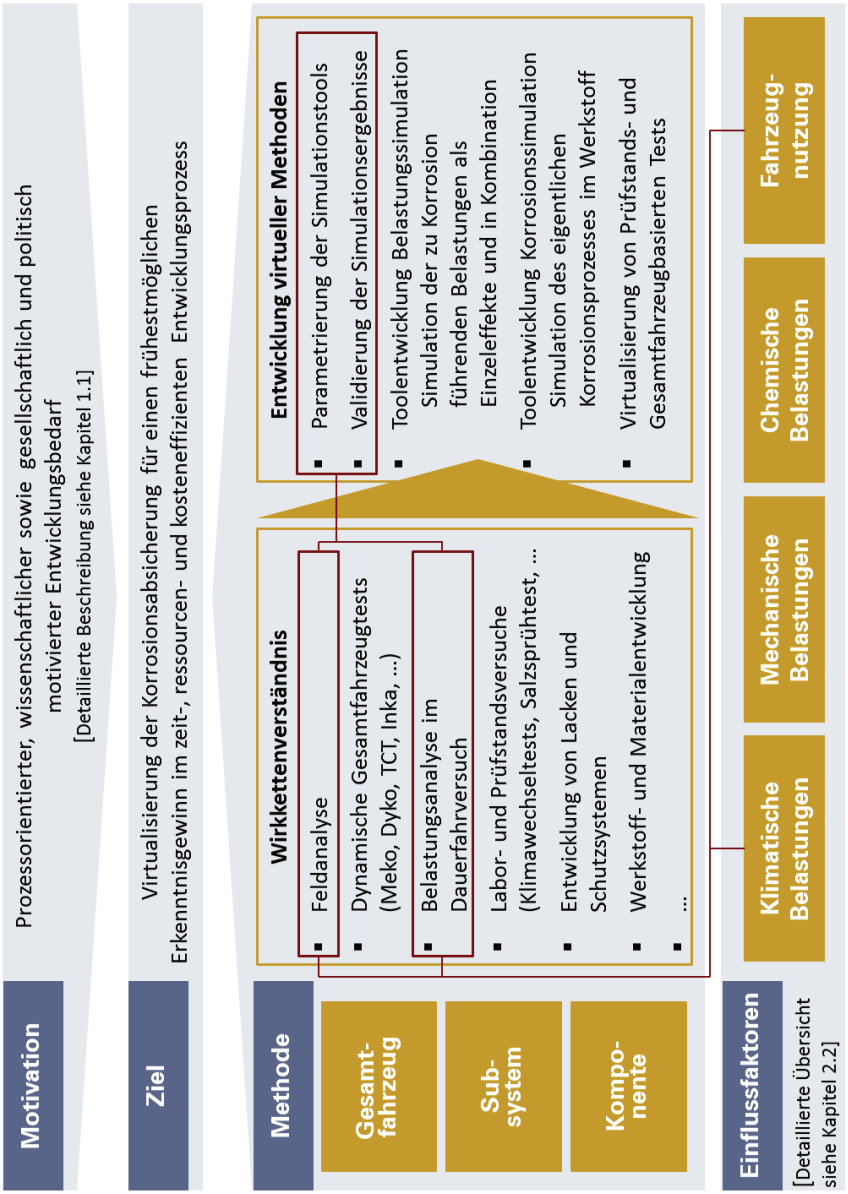

Abbildung 1: Einordnung der Dissertation in den Kontext der Forschungsthematik und Kennzeichnung der im Rahmen der Dissertation gewählten Arbeitsgebiete.

2 Theoretische Vorbetrachtungen

2.1 Allgemeine Grundlagen des Korrosionsprozesses

In DIN 50900 wird der Begriff Korrosion wie folgt definiert: „Korrosion ist die Reaktion eines metallischen Werkstoffes mit seiner Umgebung, die eine messbare Veränderung des Werkstoffes bewirkt und zu einer Beeinträchtigung der Funktion eines metallischen Bauteiles oder eines ganzen Systems führen kann. In den meisten Fällen handelt es sich um eine elektrochemische Reaktion. In einigen Fällen kann sie jedoch auch chemischer oder metallphysikalischer Natur sein.“ [Bra13]

Nach Gerthsen [Ger06] ist die weitaus häufigste Ursache für Korrosionsschäden an metallischen Werkstoffen die elektrochemische Korrosion. Für das System Kraftfahrzeug gilt dementsprechend, dass die relevantesten Korrosionsprozesse elektrochemischen bzw. elektrolytischen Ursprungs sind. [Dav12] Mit diesem Hintergrund liegt der Fokus der in dieser Arbeit vorgestellten Inhalte auf ebendiesen Korrosionserscheinungen.

Unter elektrochemischer bzw. elektrolytischer Korrosion ist die Metallauflösung (Oxidation) unter Einwirkung eines flüssigen Mediums mit elektrolytischer Leitfähigkeit (Elektrolyt) und gleichzeitiger Reduktion eines Oxidationsmittels unter Ausbildung eines Stromkreises, welcher aus einem Elektronenstrom im Metall und einem Ionenstrom im Medium besteht, zu verstehen. [Wen98]

Eine elektrochemische Korrosion findet immer dann statt, wenn ein Metall mit einer elektrisch leitenden Flüssigkeit (Elektrolyt) in Kontakt kommt. Als Auslöser für elektrochemische Korrosion ist bereits eine dünne, adsorbierte Wasserschicht auf der Metalloberfläche ausreichend, welche sich ab etwa 60 bis 80% relativer Feuchte ausbilden kann. [Pet13]

Eine Elektrolytlösung besteht aus frei beweglichen, elektrisch geladenen Molekülbestandteilen - den positiven Kationen und den negativen Anionen. Das Metall besteht aus einem starren Verband (Gitter) von positiv geladenen Atomrümpfen (Gitterkationen) sowie frei beweglichen, negativen elementaren Ladungsträgern. Über die Grenze zwischen Metall und Elektrolytlösung (Phasengrenze) können Elektronen und Ionen in beiden Richtungen ausgetauscht werden. [Kan89]

Der die eigentliche Korrosion bewirkende Oxydationsprozess der Metalle wird als anodischer Teilprozess bezeichnet, der die Korrosion ermöglichende Reduktionsprozess als kathodischer Teilprozess. [Ger06] Exemplarisch für Eisen erfolgen die im Folgenden beschriebenen Reaktionen, deren Ablauf auch in Abbildung 2 dargestellt ist.

Der anodische Teilprozess, die Oxidation, verläuft entsprechend folgender chemischer Gleichung:

$$2\,Fe \rightarrow 2\,Fe^{2+} + 4e^{-}$$

Gleichzeitig läuft ein kathodischer Reduktionsprozess ab, bei dem Elektronen unter der Bildung von Hydroxylionen verbraucht werden:

$$O_2 + 2H_2O + 4e^{-} \rightarrow 4OH^{-}$$

Auf die anodischen und kathodischen Teilreaktionen folgt unter Annahme eines neutralen, belüfteten, wässrigen Elektrolyten die Gesamtreaktion in Form folgender Redoxreaktion:

$$2\,Fe + O_2 + 2H_2O \rightarrow 2\,Fe(OH)_2$$

In der weiteren Reaktion mit Sauerstoff und Wasser entsteht u.a. Eisen(III)-oxidhydroxid FeO(OH) + H_2O, was auch als Eisen(III)-oxid-Hydrat $Fe_2O_3 \cdot H_2O$ geschrieben wird. Umgangssprachlich wird diese Verbindung als Rost bezeichnet. [Ger06]

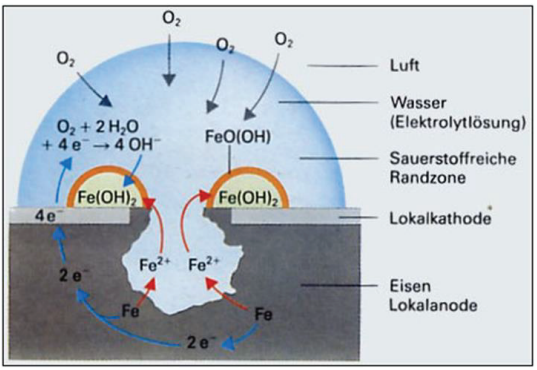

Abbildung 2: Korrosion von Eisen [Ott05]

Die anhaltende elektrochemische Aktivität bewirkt einen kontinuierlichen Elektronenfluss im Metall von Anode zu Kathode, was schließlich zur Perforation, also Zersetzung des Substrats, führt. Die Sauerstoffkorrosion/Oxidation in der Erdatmosphäre und unter entsprechenden Umgebungsbedingungen wird als atmosphärische Korrosion bezeichnet. Die Belastung der Atmosphäre mit sauren Abgasen (besonders SO_2), sauer reagierenden Schwebstoffen (Ruß- und Kohlepartikel), Chlorid (Streusalz) und Ähnlichem führt zur Intensivierung der Korrosionsreaktion aufgrund eines dann reaktionsfreudigeren Elektrolyten. [Pet13] Die atmosphärische Korrosion führt weiterhin zum Abbau von Schutzschichten auf natürlich passivierenden Metallen wie Aluminium, Chrom und Zink. [Kan89]

Laut Thiessen ist "*Die atmosphärische Korrosion … die häufigste Art korrosiver Belastung von metallischen Konstruktionswerkstoffen.*" [Thi17].

Neben dem Oxidationsprozess gibt es eine weitere elektrolytische Korrosionsform, welche besonders für Fahrzeuge in Mischbauweise, also aus mehreren metallischen Partnern bestehend, von großer Relevanz ist: die Kontaktkorrosion.

Wenn zwei Metalle in Gegenwart eines Elektrolyten (bspw. ein Feuchtigkeitsfilm) in Kontakt sind, kommt es zu Kontaktkorrosion. Das Metall mit dem niedrigeren (negativen) elektrochemischen Potenzial fungiert als Anode, welche Elektronen abgibt und sich dadurch allmählich auflöst. [Dav12] Folgende Reaktion findet statt:

$$Me \rightarrow Me^{2+} + 2e^{-}$$

Als Kathode wirkt das Metall mit dem höheren bzw. weniger negativen elektrochemischen Potenzial. Die freien Elektronen, die an der Kathode ankommen, reagieren mit dem Elektrolyten. Kontaktkorrosion muss beispielsweise bei der Wahl von Verbindungselementen wie Schrauben berücksichtigt werden. In der Technik wird dieser Prozess gelegentlich auch bewusst genutzt, um mit einer „Opferanode“ (z.B. Zink) sicherheitskritische Bauteile vor Korrosion zu schützen, bis die Opferanode aufgebraucht ist.