Institut für Werkstoffe und Verarbeitung

Lehrstuhl für Angewandte Materialwissenschaften

Rechnergestützte Schadenanalyse am Beispiel der Korrosion

Helmut Rauner

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. J. K. Gregory

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Kh.G. Schmitt-Thomas, em.
2. Univ.-Prof. Dr. rer. nat., Dr.-Ing. habil. E. Wendler-Kalsch Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
3. Univ.-Prof. Dr.-Ing. U. Lindemann

Die Dissertation wurde am 10.06.1998 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 30.07.2001 angenommen.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung 1

1.1. Problemstellung 2

1.2. Ziel der Arbeit 2

1.3. Organigramm 3

2. Stand der Technik 4

2.1. Systematische Schadenanalyse 4
2.1.1. Ansatz und Durchführung der Schadenanalyse 4
2.1.2. Systematisierungshilfen der Schadenanalyse 6
2.1.3. Probleme der Schadenanalyse 11

2.2. Expertensysteme 14
2.2.1. Künstliche Intelligenz 14
2.2.2. Aufbau der Expertensysteme 16
2.2.3. Wissensarten 18
2.2.4. Möglichkeiten der Wissensmodellierung 19
2.2.5. Hilfsmittel der Expertensystementwicklung 21

2.3. Systematisierung der Korrosion 23

2.4. Bestehende Rechnersysteme im Bereich der Korrosion 25

3. Systematische Beschreibung der Korrosionsarten 28

3.1. Vorgehensweise 28

3.2. Korrosionsartenbeschreibung 31
3.2.1. Gleichmäßige Flächenkorrosion 31
3.2.2. Muldenkorrosion 31
3.2.3. Kontaktkorrosion 31
3.2.4. Lochkorrosion 33
3.2.5. Spaltkorrosion 36
3.2.6. Berührungs- und Belüftungskorrosion 37
3.2.7. Interkristalline Korrosion 38
3.2.8. Erosionskorrosion 40
3.2.9. Flüssigkeitsaufprallerosion (Tropfenschlag) 42
3.2.10. Kavitationskorrosion 43
3.2.11. Feststoffaufprallkorrosion 43
3.2.12. Schwingungsrisskorrosion (Korrosionsermüdung) 44
3.2.12.1. Schwingungsrisskorrosion an aktiven Werkstoffoberflächen 45
3.2.12.2. Schwingungsrisskorrosion an passiven Werkstoffoberflächen 47
3.2.13. Spannungsrisskorrosion 47
3.2.14. Schichtkorrosion 51
3.2.15. Spongiose 51
3.2.16. Entaluminierung und Entzinkung 52

3.2.17. Filiformkorrosion 52

3.3.Bewertung hinsichtlich der Expertensystemeignung 52

4. Lücken im bisherigen System der Wissensakquisition 53

5. Realisierung einer rechnergestützten Schadenanalyse 54

5.1.Phasen einer Expertensystementwicklung 54

5.2.Feststellung des Problemtyps 54

5.3.Wahl der Wissensrepräsentation 55

5.4.Auswahl einer Programmierumgebung 56

5.5.Expertensystemgeeignete Strukturierung des Korrosionswissens 60
5.5.1. Methodische Vorgehensweise 60
5.5.1.1. Die PROSA als methodische Grundlage 61
5.5.1.2. Verkettungsmöglichkeiten 61
5.5.1.3. Berücksichtigung von Unsicherheiten 63
5.5.1.3.1. Wahrscheinlichkeitstheoretische Betrachtung 63
5.5.1.3.2. Fuzzy logic 64
5.5.2. Erstellung einer Korrosionssystematik 65
5.5.3. Korrosionsschadenanalyse anhand des Schadenbildes 69
5.5.4. Korrosionsschadenanalyse anhand der Schadenmechanismen 81
5.5.4.1. Korrosionsablaufpläne für un-/niedriglegierten Stahl 88
5.5.4.2. Korrosionsablaufpläne für nichtrostenden Stahl 97
5.5.5. Werkstoff-Mediums-Datenbank 105

5.6. Erstellung des Systems 106

6. Beispiele zur Überprüfung der Arbeitsweise des Systems im Vergleich zu einem menschlichen Gutachter 113

6.1.Beschreibung des Basisgutachtens 113

6.2.Überprüfung des Ergebnisses mit der rechnergestützten Schadenanalyse 114

6.3.Überprüfung der Datenbank des Werkstoff-Medium-Beständigkeitssystems 118

7. Diskussion und Ausblick 120

8. Kritische Wertung des Systems 128

9. Zusammenfassung 129

10.Literaturverzeichnis 130

11.Summary 138

1. Einleitung

Neben den mechanischen Schäden ist die Korrosion die häufigste Ursache für Bauteilschäden. Die auftretenden Primär- und Folgekosten werden von internationalen Materialforschungs- und Wirtschaftsinstituten auf viele Milliarden Dollar pro Jahr geschätzt [1, 2]. In den Industrienationen entstehen der Volkswirtschaft Schäden im Wert von ca. 3,5 bis 4,2 % des Bruttosozialproduktes aufgrund der Korrosion [3], was in Deutschland einer Summe von ca. 50 Mrd. DM pro Jahr entspricht [4]. Von diesen Schäden könnten durch den Einsatz des über den Korrosionsschutz bereits vorhandenen Wissens problemlos 10 % eingespart werden [5].

Ein Beispiel für die beträchtlichen Kosten stellt die Deutsche Bundesbahn dar. Sie wendet allein zur Erhaltung der Oberbauten jährlich mehr als 50 Millionen DM auf. Nach Erfahrungswerten muss in weiten Anwendungsbereichen mit Verlusten zwischen 5 bis 10 % des Jahresprodukts gerechnet werden, woraus sich eine mittlere Lebensdauer von 10 bis 20 Jahren ergibt [2].

Diese enormen finanziellen Aufwendungen beruhen darauf, dass die Maschinen meist für einen längeren Zeitraum stillstehen, bis die Ersatzteile geliefert und Reparaturen vorgenommen werden können, was zu erheblichen Produktions- und somit Absatzausfällen führt. Außerdem bedingen das Instandsetzungspersonal und die benötigten Bauteile oft hohe Kosten. Daneben müssen die indirekten Verluste durch einen Anlagenausfall berücksichtigt werden, da hohe Konventionalstrafen auftreten können und das Unternehmen damit seinen Ruf als zuverlässiger Geschäftspartner verlieren kann.

Neben diesen rein wirtschaftlichen Aspekten darf der Umweltgesichtspunkt nicht übersehen werden, da es aufgrund von Korrosion zu erheblichen Umweltverschmutzungen kommen kann, wenn ein Tank oder ein Rohr durch Korrosion undicht wird und z.B. ausgelaufenes Öl ins Grundwasser gelangt. Des weiteren müssen Hygienegesichtspunkte berücksichtigt werden, da durch Korrosionsprodukte Nahrungsmittel und Trinkwasser verseucht werden können [6].

Aus diesen Gründen wird die Qualität und Sicherheit der Produkte zusehends zum entscheidenden Faktor für eine stabile Marktbehauptung und Konkurrenzfähigkeit eines Unternehmens.

Primäres Ziel zur Erhaltung der Konkurrenzfähigkeit ist deshalb nicht nur die Qualitätssicherung, sondern vor allem die Qualitätssteigerung durch Nutzung aller vorhandenen technischen Möglichkeiten. Eine wesentliche Aufgabe der Ingenieure ist daher die systematische Analyse von Schäden und die Umsetzung der daraus gewonnenen Erkenntnisse in konkrete Produktverbesserungen. Prinzipiell wird diese Vorgehensweise bereits heute eingesetzt, wobei sich das über Jahre durch Erfahrung gesammelte Wissen meist in der Person eines Schadeningenieurs akkumuliert. Wesentlicher Nachteil dieses Prinzips ist der meist völlige Verlust dieser Erfahrung mit dem Ausscheiden des Mitarbeiters aus dem Unternehmen.

Um diesen Verlust zu verhindern oder zumindest abzuschwächen, wird seit einigen Jahren versucht, das Wissen mit Hilfe der elektronischen Datenverarbeitung in Form von Expertensystemen zu konservieren und weniger erfahrenen Mitarbeitern zugänglich zu machen.

1.1. Problemstellung

Obwohl die Gefahren der Korrosion und ihre Auswirkungen immer genauer bekannt werden, gehen die Verluste durch Korrosionsschäden nicht zurück.
Das liegt daran, dass das vorhandene Wissen trotz erheblicher Anstrengungen und Fortschritte immer noch zu wenig systematisch aufbereitet und somit nach wie vor nur wenigen Experten zugänglich ist. Die Korrosion ist im Bereich der Schadenanalyse nur schwer mit Formeln und Zahlen zu erfassen, so dass neben den allgemeinen Grundlagen hauptsächlich Erfahrungswissen vorliegt, das von einzelnen Fachleuten im Laufe ihres Berufslebens gesammelt und publiziert wird. Dies hat zur Folge, dass jemand, der sich mit Korrosion befasst, sich zuerst mit vielen Veröffentlichungen beschäftigen muss, um sich das benötigte Wissen anzueignen.
Es fehlt eine geeignete strenge Systematik, die Nichtexperten den Einstieg und die grundlegende geistige Einordnung der einzelnen Zusammenhänge erleichtert. Ein derartiges System würde aufgrund seiner Erweiterbarkeit außerdem verhindern, dass das Wissen mit dem Ausscheiden eines Experten aus der Fachwelt verloren geht.
Weiterhin wäre es praktisch, wenn diese Korrosionsstruktur rechnergestützt verfügbar wäre, um dem Korrosionsschadengutachter den Weg zur Schadenlösung zu erleichtern.

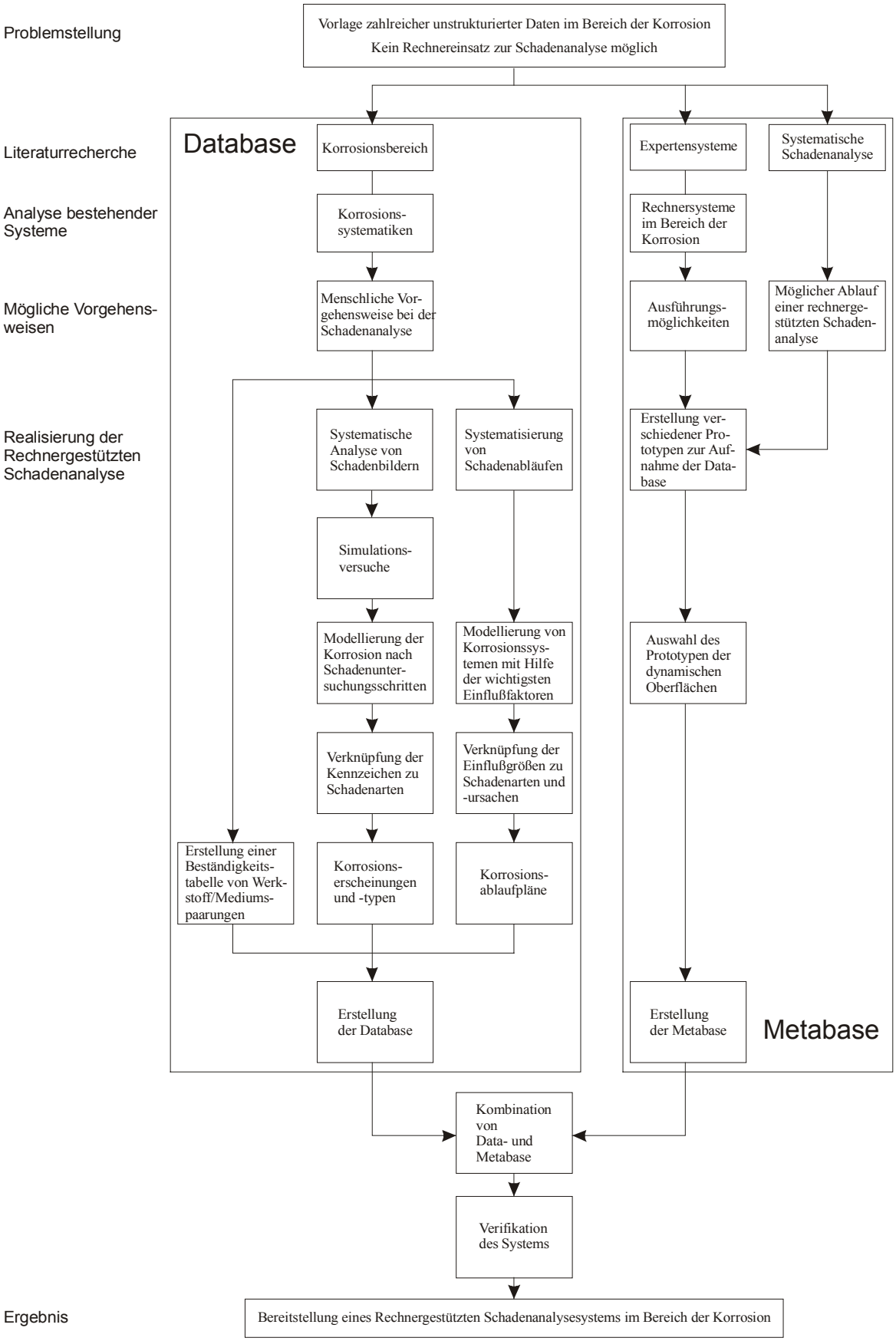
1.2. Ziel der Arbeit

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es somit, die Möglichkeiten und Grenzen einer rechnergestützten Schadenanalyse im Bereich der Korrosion zu untersuchen. Dazu soll beispielhaft eine Grundsystematik der Korrosion aufgestellt werden, die auch von Gutachtern, die im Bereich der Korrosion nicht so versiert sind, relativ einfach angewendet und von Korrosionsfachleuten jederzeit erweitert oder für bestimmte Anwendungsbereiche abgewandelt werden kann. Dieses System soll eine Einarbeitung und die Erfassung der Thematik erleichtern, wobei sie so angelegt sein soll, dass sie dem Anwender eine Vorgehensweise gibt, wie er einen Korrosionsschaden klären kann. In dieser Arbeit wird eine Beschränkung auf die elektrochemische Korrosion vorgenommen, um ein konsistentes überschaubares System zu ermöglichen. Außerdem wurde der Teil der Arbeit, der sich mit den Korrosionsmechanismen beschäftigt, beispielhaft auf die un-/niedriglegierten und die nichtrostenden Stähle eingeschränkt, von denen die anderen nicht passivierenden und passivierenden Werkstoffe abgeleitet werden können.
Des weiteren erscheint es sinnvoll, dieses Gedankenmodell in Form eines Expertensystems aufzubereiten. Damit könnte das Wissen mit Hilfe eines einfachen Mediums verbreitet werden, das den Anwender bei der Schadenbearbeitung problemlos leiten kann, da es seinen Blick auf das Wichtigste fokussiert.

Bei der Erstellung dieses Expertensystems soll sowohl bei der Modellierung als auch bei der Rechnerversion auf eine Grundform geachtet werden, die eine Implementierung anderer Schadenarten wie Tribologie oder mechanische Schäden ohne großen Aufwand ermöglicht.

Folglich ist das Ziel die Erstellung einer rechnergestützten Schadenanalyse am Beispiel der elektrolytischen Korrosion unter besonderer Berücksichtigung der Grenzen und Möglichkeiten dieses Verfahrens.

1.3. Organigramm



2. Stand der Technik

2.1. Systematische Schadenanalyse

Schadenanalyse wird vermutlich schon so lange betrieben, wie es technische Erzeugnisse gibt. Während sie anfangs sehr einfach gehandhabt wurde, entwickelte sie sich in den letzten 20-30 Jahren zu einer eigenen Wissenschaft, was damit begründet werden kann, dass sich die Methoden zur Untersuchung eines Schadens in dieser Zeit beträchtlich weiterentwickelt haben und die Komplexität der modernen Produkte zugenommen hat.
Früher bestand eine Maschine nur aus wenigen, meist überdimensionierten Bauteilen, die im Schadenfall einfach ersetzt wurden. Die heutigen Geräte sind dagegen aus einer Vielzahl von Einzelteilen aufgebaut, die alle gewichts- und dimensionsoptimiert sind, um nicht nur die technischen, sondern auch die wirtschaftlichen Anforderungen unseres Zeitalters zu erfüllen. Daraus folgend müssen nun bedeutend mehr Faktoren bei einer Untersuchung berücksichtigt werden, weswegen verschiedene Methoden zur systematischen Vorgehensweise bei der Schadenanalyse entwickelt wurden, um die entstandene Komplexität überschauen zu können.
Dabei muss besonderer Wert auf die Systematik des Vorgehens gelegt werden, um die Schadenanalyse nachvollziehbar zu gestalten, so dass sie auch vom Auftraggeber verstanden werden kann. Außerdem garantiert sie eine vollständige Untersuchung, in deren Verlauf kein Hinweis übersehen wird, der eventuell zu einem anderen Ergebnis führen könnte.

2.1.1. Ansatz und Durchführung der Schadenanalyse

Das Hauptziel der Schadenanalyse ist die Klärung der Ursache, die zum Versagen eines Bauteils geführt hat, damit der Schaden behoben und eventuell an anderen Anlagen verhindert werden kann.

Das Gebiet der Schadenanalyse beruht auf der Tatsache, dass Schäden nicht, wie gemeinhin angenommen, unberechenbare zufällige Ereignisse sind. Sie laufen nach logischen Zusammenhängen ab und werden nur dann unvorhersehbar, wenn bestimmte Einflussparameter unberücksichtigt bleiben oder falsch eingeschätzt werden [7]. Das bedeutet, dass auch sehr komplexe Schäden streng gesetzmäßige Abläufe haben. Sie müssen nur in die einzelnen Faktoren dieser Abläufe aufgeteilt werden, was bereits in zahlreichen Richtlinien und Prüfblättern erfolgt ist. So ist zum Beispiel ein Bruch durch mehrere nachfolgend aufgeführte Kennzeichen charakterisiert, die untersucht werden müssen, um eine Schadenart genau feststellen zu können [6]:

- Höhe der Beanspruchung
- Grad der makroskopischen plastischen Verformung
- Verlauf der Trennung durch das Gefüge
- Erscheinungsbild der Bruchfläche
- Belastungsart
- Beanspruchungsart

Diese Aufstellung zeigt, dass man einen Bruch in verschiedene Einzelphasen einteilen kann und muss, um die Schadenart eindeutig bestimmen zu können. Aus der Schadenart wiederum lässt sich die Schadenursache ableiten, woraus sich eine eindeutige Kette vom Schadenerscheinungsbild zur Schadenursache ergibt, deren Findung schließlich das Ziel ist [8].

Jedes Bauteil hat einen sogenannten Soll-Zustand, in dem sich das Anforderungsprofil, das das Werkstück aushalten sollte, ausdrückt. Es bezieht sich also auf die möglichen Umwelteinflüsse wie Kräfte oder Medien, die am Einsatzort theoretisch vorliegen könnten. Dem gegenüber steht der Ist-Zustand, der sich auf das Eigenschaftsprofil eines Bauteils bezieht, also darauf, welche Umwelteinflüsse ein Werkstück wirklich ertragen kann.
Eine Abweichung zwischen Soll- und Ist-Zustand führt zu einem Schaden. Sie kann durch die vier verschiedenen Schadenursachen

- Konstruktions-,
- Werkstoff-,
- Fertigungs-,
- Betriebsfehler

ausgelöst werden. Die Aufgabe der Schadenanalyse ist es nun herauszufinden, welche Fehlerart vorgelegen hat [8].

Schäden entstehen immer nach dem gleichen Mechanismus. Es treten ein oder mehrere Fehler als Schadenursachen auf, die eine bestimmte Schadenart auslösen. Jede Schadenart hat ihr typisches Schadenbild, mit dem es am geschädigten Bauteil in Erscheinung tritt (vgl. Abb. 1).

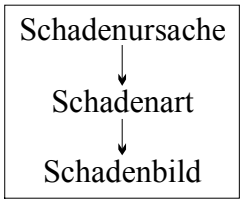


Abbildung 1: Ablauf eines Schadens [7]

Aufgrund dieses einheitlich ablaufenden Mechanismus kann bei der Schadenanalyse in umgekehrter Reihenfolge vorgegangen werden.
Zuerst wird das Schadenbild analysiert, wobei nur vom Bauteil und vom Werkstoff ausgegangen wird und man sich der werkstoffkundlichen Untersuchungsmethoden bedient. Anhand dieser Untersuchungen kann man auf die Schadenart schließen.
Im nächsten Schritt ist es dann wichtig, die Schadenursache, also den auslösenden Fehler herauszufinden. Dafür reicht jedoch das Bauteil allein nicht aus, sondern es müssen weitergehende Betrachtungen angestellt werden, die Fertigungs- oder andere Umwelteinflüsse berücksichtigen (vgl. Abb. 2).

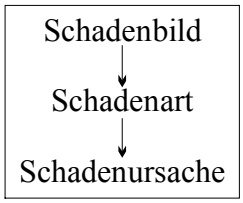


Abbildung 2: Ablauf der Schadenanalyse [7]

Anhand dieser Betrachtung wird deutlich, dass man eine klare Unterscheidung zwischen Schadenart und -ursache treffen muss, und dass entsprechend dazu auch unterschiedliche Untersuchungsmethoden nötig sind [8].

2.1.2. Systematisierungshilfen der Schadenanalyse

Obwohl der Rechnereinsatz in der Schadenanalyse aufgrund der dynamischen Entwicklung, die die Computer in den letzten Jahren erfahren haben, ein logische Folge ist, stellt er nicht den ersten Ansatz zur Systematisierung der Schadenuntersuchung dar. Seit vielen Jahren, bevor überhaupt an eine derartige Verwendung dieser Technologie gedacht wurde, sind Hilfsmittel für die Schadenbearbeitung aufgestellt worden, die sich in graphische und methodische Hilfen unterteilen lassen.

Graphische Hilfsmittel

Die graphischen Hilfsmittel dienen dazu, das in einzelne Kennzeichen aufgelöste Schadenbild mit den möglichen Schadenarten oder -ursachen, wenn diese explizit benannt werden können, zu verbinden. Sie haben also den Zweck, komplexe reale Systeme aufzulösen und Wirkzusammenhänge zu veranschaulichen.
Dabei kann das Abstraktionsniveau sehr unterschiedlich sein. Es kann bei einfachen Problemen sehr oberflächlich sein, während bei komplexen Schäden ein relativ hoher Detaillierungsgrad vorliegen muss, der eine umfangreiche graphische Darstellung erfordert. Je detaillierter ein Hilfsmittel also ist, desto unübersichtlicher stellt es sich dar und dementsprechend schwierig wird die Handhabung.
Im großen und ganzen handelt es sich bei den graphischen Hilfsmitteln um die Grundformen der Matrix und des Relevanzbaumes, von denen sich alle anderen ableiten.

Schadenbild-Schadenursache-Matrizen (vgl. Abb. 3) dienen zur übersichtlichen Darstellung von aus Schadenanalysen gewonnenen Erkenntnissen [9]. Dabei werden in der Kopfzeile unterschiedliche Schadenbilder aufgegliedert in ihre konkreten Schadenmerkmale aufgetragen, während in der Randspalte ursächliche Fehler aufgeführt sind, die zur besseren Übersichtlichkeit in Ursachengruppen eingeteilt sind. An den zutreffenden Kreuzungspunkten der Spalten und Zeilen werden Markierungen vorgenommen.

		Schadenbild	Brüche			Verschleiß				Deformation				Risse			Ermüdung	
			Bruch der Lagerringe	Bruch der Käfige	Ausbrüche	Laufspuren	Normaler Verschleiß	Riefen	Fresser, Anschmierungen	Bruchstellen	Verformungen	Eindrückungen	Markierungen	Wärmerisse	Härterisse	Schleifrisse	Werkstoffabblätterungen	Risse
Schadenursache																		
Materialfehler	Gefügefehler		x														x	x
Materialfehler	Falsche Material-paarung						x		x									
Fertigungsfehler	Unsachgemäße Wärmebehandlung						x										x	x
Fertigungsfehler	Unsachgemäßes Schleifen															x		

Abbildung 3: Schadenbild-Schadenursache-Matrix für Wälzlager [10]

Solche Matrizen sind ein sehr gutes Hilfsmittel zur Ermittlung der Schadenart oder -ursache. Allerdings steigt mit zunehmender Komplexität auch die Unübersichtlichkeit derartiger Matrizen, weswegen sie besser für überschaubare Gebiete geeignet sind. Für die Korrosion stellt die VDI-Richtlinie 3822 einen ähnlichen Ansatz dar, der sich auf die Beschreibung der Erscheinungsform der einzelnen Korrosionsarten in Zuordnung zu den verschiedenen schadenanalytischen Untersuchungsmethoden beschränkt und keine differenzierte Schilderung der einzelnen Merkmale liefert.
Ein Nachteil der Matrix ist, dass lediglich die Schadenart oder -ursache den Schadenkennzeichen gegenübergestellt wird, während sie keine Erklärungen über Schadenverläufe liefern kann [11].

In einem Relevanzbaum können dagegen Zusammenhänge eines Systems in hierarchischen Strukturen dargestellt werden (vgl. Abb. 4) [5,8]. Mit dieser Methode können einzelne Schadenverläufe mit beliebigem Detaillierungsgrad in einzelne Mechanismen aufgelöst werden, wobei die Schadenursache oder -art als abstraktes Ereignis an der Spitze des Relevanzbaumes steht und sich in mehrere konkrete Fehleräste verzweigt, wobei sämtliche Subsysteme durch Äste miteinander verbunden sind. Durch die Äste eines Relevanzbaumes werden lediglich Beziehungen ausgedrückt, die aber nicht näher spezifiziert werden, weswegen es sich also nicht um konkrete Kausalzusammenhänge handelt [9, 10].

Der Relevanzbaum ist somit nur eine einfache Darstellungsweise wie die Schadenbild-Schadenursache-Matrix. Er wurde jedoch in mehreren Formen weiterentwickelt, die sich unter anderem dadurch auszeichnen, dass die Verzweigungspunkte in der Baumstruktur zu bestimmten logischen Verknüpfungen erweitert sind, womit aus bislang undefinierten Beziehungen Kausalitäten werden [11]. Es handelt sich dabei um die Ereignisablauf- und Fehlerbaumanalyse, die in den DIN-Normen 25419 und 25424 genormt sind [12, 13, 14]. Beide sind sehr gut für funktionale Modelle geeignet, d.h., sie beschreiben die konkrete Funktion eines Systems und interpretieren jegliche Abweichungen [15]. Sie eignen sich somit hauptsächlich zur Beschreibung eines bestimmten Diagnoseobjekts wie z.B. einer technischen Anlage.

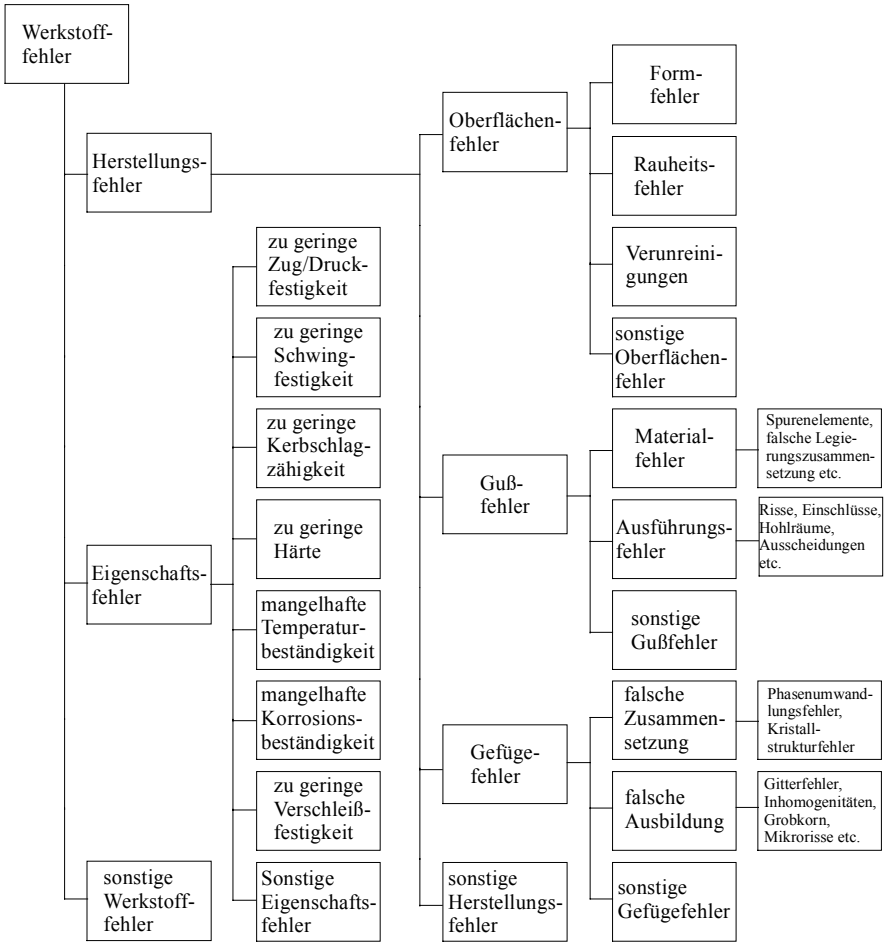


Abbildung 4: Relevanzbaum für Werkstofffehler [8]

Methodische Hilfsmittel

Im Gegensatz zu den graphischen handelt es sich bei den methodischen Hilfsmitteln nicht um eine leicht verständliche und problemlos anwendbare Aufbereitung eines bestimmten Fachgebietes, sondern um bestimmte Vorgehensweisen, mit denen ein Schaden systematisch bearbeitet werden kann. Sie geben allgemeine Anhaltspunkte, wie man auf verschiedene Aspekte eines Schadens schließen kann. Ihre Betrachtung ist für eine rechnergestützte Schadenanalyse unerläßlich, da diese eine allgemeine Systematisierung darstellen soll, die für alle Schadenbereiche anwendbar ist. Es gibt mehrere Methoden, die sich mit verschiedenen Phasen der

Schadenbearbeitung beschäftigen. Bei konsequenter Anwendung lässt sich somit ein Bogen vom ersten Kontakt mit dem Schaden bis zur Klärung der Schadenursache schlagen.

Zur Eingrenzung von komplexen Schäden eignet sich besonders die Ausfalleffektanalyse, die in DIN 25448 genauer dargestellt ist [16], da mit Methoden wie beispielsweise der nachfolgend erklärten PROSA, die sich mit der Klärung der Schadenart beschäftigen, nur einzelne Komponenten, Komponentengruppen oder -teilgruppen sinnvoll bearbeitet werden können [7]. Somit ist es das Ziel der Ausfalleffektanalyse, im Vorfeld der eigentlichen Schadenanalyse die Teile herauszufinden, die für den Schaden verantwortlich sein könnten und deswegen genauer untersucht werden müssen. Sie zeigt in Zusammenwirkung mit einer Ausfallbedeutungs- und einer Gefahrenanalyse, was der Ausfall eines bestimmten Bauteils für das gesamte System bedeutet.
Es handelt sich um ein äußerst aufwendiges Verfahren, das meist nur sinnvoll ist, wenn entsprechende Unterlagen bereits aus der Systementwurfphase vorhanden sind, während die Erstellung einer Ausfalleffektanalyse nach Schadeneintritt nur wirtschaftlich ist, wenn es sich um große bis sehr große technische Systeme handelt [11].
Die Ausfalleffektanalyse ist folglich für eine unmittelbare rechnergestützte Schadenanalyse nur bedingt geeignet.

Im Gegensatz dazu beruht die PROSA darauf, dass jeder Schaden nach einer gleichen Systematik, die vom speziellen Schadenfall unabhängig ist, bearbeitet und analysiert werden kann. Schäden können aufgrund vieler Schadenursachen entstehen, wobei aber immer wieder die gleichen Schadenbilder auftreten. Es handelt sich dabei um einzelne Spuren, die für jede Schadenart charakteristisch sind. So gibt es im Bereich der Korrosion mehrere verschiedene Schadenarten wie zum Beispiel die abtragende Korrosion oder die Schwingungsrisskorrosion, deren praktische Erscheinungsformen jeweils spezifische Kennzeichen zeigen. Diese Tatsache ist der entscheidende Angriffspunkt für ein allgemeingültiges Expertensystem.
Bei dieser Untersuchungsmethode handelt es sich um ein System, das Daten aus verschiedenen Informationsfeldern miteinander verknüpft und vergleichend gegenüberstellt. Die Erarbeitung der einzelnen Daten wird nach spezifischen Abfragesystemen strukturiert. Der Ansatz von Laboruntersuchungen, wie zum Beispiel die Fraktographie, die Metallographie oder die chemische Analyse, leitet sich aus den Informationsfeldern „Vorgeschichte (Vorgaben, Berechnung, Konstruktion, Fertigung, Betrieb)“ und „Schadenaufnahme an der Anlage“ ab. Es werden daraus Hypothesen gebildet, die nun zu ihrer Überprüfung die Grundlage zum Ansatz einer gezielten Probenahme und eines ersten Untersuchungsschrittes ergeben. Jedem Untersuchungsschritt folgt ein Entscheidungsschritt zur Bewertung der Untersuchung. Je nach der gefällten Entscheidung ergibt sich eine Folge von Untersuchungsschritten, bis aus den Laboruntersuchungen ein Ist-Zustand des Schadenteils oder der Komponente definiert werden kann. Der Ist-Zustand beinhaltet die Eigenschaften des Bauteils oder der Komponente und die an der Komponente abgeleiteten Beanspruchungen. Dieser Ist-Zustand aus den Laboruntersuchungen wird einem Soll-Zustand aus den getroffenen Vorgaben gegenübergestellt. Daraus ergeben sich dann Deckungslücken zwischen Vorgaben (Soll) und tatsächlichen Eigenschaften sowie den Betriebsbedingungen (Soll/Ist). Aus diesen Lücken lässt sich dann eine Scha-

denursache ableiten, oder es werden zusätzliche Untersuchungen, zum Beispiel Simulationsuntersuchungen, erforderlich (vgl. Abb. 5) [8].
Die PROSA kann somit als Leit- und Dokumentationssystem zur systematischen Schadenuntersuchung angesehen werden, bei dem durch ein laufendes Wechselspiel von Untersuchungs- und Entscheidungsschritten letztlich die Schadenursache ermittelt wird [17].

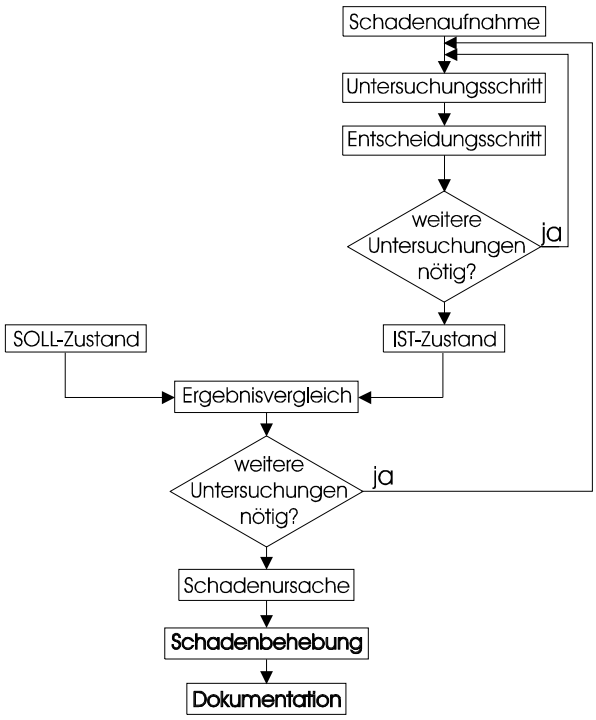


Abbildung 5: PROSA [18]

Dabei hat die Erfahrung gezeigt, dass mehrere Untersuchungsschritte notwendig sind, um einen Schaden eindeutig einzugrenzen. Beispielsweise haben die strömungsbeeinflusste Korrosion und die Flüssigkeitsaufprallerosion bei un- und niedriglegierten Stählen ein gleichartiges makroskopisches Erscheinungsbild. Erst bei der Analyse der Abtragsprodukte kann man eine genaue Festlegung treffen, da es sich bei der strömungsbeeinflussten Korrosion immer um Oxidationsprodukte des abgetragenen Metalls handelt, während sie bei der Flüssigkeitsaufprallerosion mit dem Material der Oberfläche identisch sind [6].

Den Abschluss bildet die Kepner-Tregoe-Methode, die dazu geeignet ist, die Überlegungen zu einer Schadenursache zu strukturieren und dadurch eine Schadenursache gezielt einzugrenzen. Sie bedient sich dabei der Fragen „Was?“, „Wo?“, „Wann?“ und „Wie?“, die im Gegenzug auch negierend gestellt werden [19]. Anhand dieses Schemas kann eine Einengung der Schadenursachemöglichkeiten vorgenommen werden, was schließlich unter Berücksichtigung des Schadenbildes zu einer Klärung des Schadens führen kann.
Das Problem dieser Methode ist, dass sie sehr allgemein abgefasst ist und vom Benutzer vor allem bei der Erarbeitung der Einzelbefunde sehr viel Denkarbeit und zusätzliche Strukturierung der Vorgehensweise bei einzelnen Untersuchungsschritten erfordert [8].

2.1.3. Probleme der Schadenanalyse

Die Schadenanalyse ist keine einfache Wissenschaft, wie sich am Widerstreit von Experten bei einzelnen Schadenfällen feststellen lässt. So gibt es Fälle, in denen von verschiedenen Seiten sehr widersprüchliche Meinungen vertreten werden. Unter der Voraussetzung, dass keine der beiden Seiten vorsätzlich eine falsche Behauptung anführt, lässt sich daraus der Schluss ziehen, dass einer der Fachleute eine fehlerhafte Analyse vorgenommen hat.
Dies kann mehrere Gründe haben. Zum einen kann es an einer generell falschen Vorgehensweise des Gutachters liegen, zum anderen an menschlichen Schwächen bei der Bearbeitung. Eine dritte Fehlerquelle ist die objektive Komponente.

Methodische Fehler

Ein methodischer Fehler ist die Nichtbeachtung der Trennungsnotwendigkeit von Arbeits- und Beurteilungsschritten bei der systematischen Schadenanalyse. Wie bereits ausgeführt wurde, ist es wichtig, zuerst einen Arbeitsschritt in Form einer bestimmten Untersuchungsmethode, mit der nach bestimmten Kennzeichen gesucht wird, vorzunehmen und dann die gefundenen Erkenntnisse sauber zu protokollieren, so dass schließlich aus allen Merkmalen ein eindeutiger Schluss gezogen werden kann. Wird diese Vorgehensweise nicht eingehalten, so kann es zu schwerwiegenden Fehlern kommen, da entweder nicht alle Kennzeichen vorhanden sind oder voreilige Schlüsse gezogen werden. Beispielsweise ist es meist sehr schwer, einen Dauerbruch von einem Bruch, der durch Schwingungsrisskorrosion ausgelöst wurde, zu unterscheiden, wenn der Schaden bei hohen Lastwechselfrequenzen und Spannungsamplituden aufgetreten ist [59]. Wird versäumt, das Agens und die beim Schadeneintritt herrschende Temperatur zu untersuchen und die Ergebnisse in der Gesamtbetrachtung zu berücksichtigen, so kann man sehr schnell zu einem falschen Schluss gelangen.

Ein weiteres methodisches Versäumnis ist, die Umwelteinflüsse außer acht zu lassen. Darunter sind alle Einflüsse zu rechnen, die weder bauteil- noch werkstoffimmanent sind, wie zum Beispiel das Auftreten von Kondenswasser in Bereichen mit wechselnden Temperaturen oder unvorhergesehene Zugspannungen durch eine gerissene Aufhängung. In diesen Bereich fallen ebenfalls Bearbeitungsfehler durch den Materiallieferanten. So liegt es im Falle von drei gleichen Behältern, von denen einer plötzlich aufgrund von Korrosionserscheinungen undicht wird, nahe anzunehmen, dass das darin enthaltene Medium zu aggressiv war. Wenn man aber berücksichtigt, dass in allen drei Behältern der gleiche Stoff enthalten war, wobei die beiden anderen Behälter unbeschädigt sind, ist eindeutig klar, dass eine andere Ursache zum Schaden geführt haben muss.

Diese Fehlermöglichkeiten legen die methodische Systematisierung der Schadenanalyse, wie sie im vorigen Kapitel kurz erläutert wurde, nahe. Die sich daraus ergebende feste Vorgehens- und Untersuchungsweise spricht für die Umsetzung dieser Systematik auf den Rechner.

Menschliche Fehler

Eine weitere Fehlerquelle, die selbst durch den Rechnereinsatz und eine noch so perfekte Systematisierung der Schadenanalyse nicht, oder zumindest in absehbarer Zeit, nicht völlig ausgeschaltet werden kann, ist der Mensch und im Falle der Schadenanalyse der Gutachter.
So liegen bei jedem Schaden objektive, physikalische Schadenmerkmale vor, die vom Bearbeiter erkannt und bewertet werden müssen. Hierbei kommt jedoch die subjektive Betrachtungsweise des Menschen ins Spiel, die ihm nur in bestimmten Grenzen ermöglicht, die eindeutigen Kennzeichen zu erkennen.
Die Probleme bei der richtigen Bewertung der Merkmale eines Schadenbildes beruhen laut Richter und Lunze auf zwei im Menschen begründeten Ursachen [20, 21]:

- Die *sensorische Unsicherheit*, die zur Folge hat, dass die menschliche Sinneswahrnehmung von Mensch zu Mensch unterschiedlich und nicht normierbar ist.
  Das bedeutet, dass nahezu jedes Merkmal von jedem beliebigen Gutachter anders gesehen und gedeutet wird, obwohl es objektiv immer gleich ist.
- Die *linguistische Unschärfe*. Selbst wenn die Kennzeichen von jedem Betrachter in ihrer objektiven Erscheinung erkannt würden, müssten sie noch mit den gleichen für alle eindeutig zuordenbaren Begriffen bezeichnet werden.
  Um zu beweisen, dass dies nicht der Fall ist, muss man nicht einmal in die Begriffswelt der Merkmale eindringen, sondern es genügen bereits zwei einfache Beispiele aus dem Bereich der Korrosionsarten. So wird die offiziell als Belüftungselement festgelegte Korrosionsart nach wie vor von vielen mit der älteren Bezeichnung als Evans-Element benannt. Dasselbe liegt bei der Berührungskorrosion vor, bei der sich hartnäckig der Name Ablagerungskorrosion hält.

Der Mensch als Gutachter impliziert jedoch nicht nur aufgrund der unterschiedlichen Wahrnehmungs- und Ausdrucksfähigkeit der einzelnen Subjekte Fehler in die Schadenanalyse. So ist es ebenfalls von Bedeutung, welchen Wissensstand und welche Vorbildung er hat. Wenn er seit Jahren ausschließlich Untersuchungen im Gebiet der mechanischen Brüche vorgenommen hat, wird er sicherlich, obwohl er mit der Vorgehensweise der Schadenanalyse vertraut ist, bei der Bearbeitung eines Korrosionsschadens aufgrund seines mangelnden Wissens in diesem Bereich erhebliche Fehler machen. Ein Chemiker dagegen wird bei der Untersuchung eines Korrosionsschadens in einem verzinkten Wasserrohr, bei der die chemische Zusammensetzung des Mediums, der Korrosionsprodukte und des Werkstoffs sowie das Zusammenspiel der einzelnen Komponenten eine bedeutende Rolle spielen, zu besseren Ergebnissen gelangen als bei der Auseinandersetzung mit der Schadenursache bei einem Antriebswellenbruch.

Ein weiterer Gesichtspunkt, der indirekt mit dem Wissensstand zusammenhängt, ist die Erfahrung. Je mehr Schäden ein Gutachter bereits bearbeitet hat, um so mehr assoziatives Wissen steht ihm zur Verfügung. Er muss also nicht bei jeder neuen Untersuchung von vorne anfangen, sondern kann sein Gedächtnis nach ähnlichen Fällen durchforschen und entsprechende Parallelen assoziieren. Dies kann zu einer schnelleren Aufnahmefähigkeit für die einzelnen Schadenmerkmale sowie des gesamten Schadenbildes führen und somit die Effektivität und Produktivität des Bearbeiters erhöhen. Andererseits beinhaltet dies jedoch die Gefahr, daß der erfahrene Gutachter anhand einiger Kennzeichen voreilige Schlüsse zieht und andere vorliegende Merkmale, die auf eine abweichende Schadenart hinweisen, außer acht lässt.

Weiterhin hängt die Güte der Schadenerfassung noch von der jeweiligen Tagesverfassung eines Gutachters ab. So können zweifellos persönliche Probleme, Zeitdruck oder andere Unpässlichkeiten den Blick des Gutachters vor allem bei der Schadenaufnahme, aber auch im weiteren Verlauf der Untersuchung für wesentliche Details, die zur Klärung des Schadens erheblich sind, trüben. In diese Kategorie fällt ebenfalls die Befangenheit gegenüber dem Auftraggeber, die bei einem neutralen Gutachter eigentlich nicht vorliegen sollte, aber bei Versicherungen, die sich vor Forderungen schützen wollen, durchaus eine Rolle spielen kann.

Objektive Fehler

Neben diesen subjektiven, hauptsächlich durch den Menschen verursachten Fehlerquellen gibt es noch die Verfälschung durch objektive Unsicherheiten.
So können Schadenmerkmale teilweise nicht mehr erkannt werden. Sei es, weil ein wichtiges Korrosionsprodukt unvorsichtigerweise entfernt wurde und deswegen einer Untersuchung nicht mehr zur Verfügung steht, oder weil eine Bruchfläche durch tribologische oder korrosive Einflüsse nach Eintritt des Schadens zerstört wurde.
Des weiteren sind bei einem Schaden die Umwelteinflüsse von höchster Bedeutung, um eine eindeutige Ursache feststellen zu können. Wurden diese jedoch vom Betreiber versehentlich nicht beachtet oder verschweigt er sie vorsätzlich, um von einem Fehlverhalten seinerseits abzulenken, ist es oft schwer, rein aus dem Schadenbild den Schadenhergang zu rekonstruieren. Wird zum Beispiel ein Schadenteil durch den Auftraggeber vorschnell ersetzt, bevor der Gutachter die Schadenstelle besichtigt und seine Aufzeichnungen gemacht hat, kann dies dazu führen, dass die Einbaulage oder eine fehlerhafte Verbindung mit anderen Bauteilen nicht mehr nachvollzogen werden kann.
Zu den objektiven Fehlern zählen ebenfalls solche, die auf Untersuchungsgeräte zurückzuführen sind. Entweder indem sie durch das Bedienpersonal falsch gehandhabt werden oder dass sie zur Feststellung eines bestimmten Merkmals schlichtweg ungeeignet sind und somit ein falsches Ergebnis liefern.

Diese kurze Aufzählung, die keinerlei Anspruch auf Vollständigkeit erhebt, zeigt, dass bei der Schadenanalyse sehr genau vorgegangen werden muss, um zum richtigen Ergebnis zu gelangen, und dass einige Fehlerquellen durch den Einsatz des Rechners als Hilfsmittel sowohl zur fachlichen als auch methodischen Unterstützung eines Gutachters vermieden werden könnten.

2.2. Expertensysteme

Es gibt zahlreiche Definitionen für Expertensysteme wie beispielsweise in [22], [24], [25], [26], [27]. Auch wenn sie sich im Wortlaut unterscheiden, ist ihnen allen gemeinsam, dass Expertensysteme das Wissen und das Problemlösungsverhalten eines Experten mit Hilfe des Rechners nachbilden sollen. Diese Kriterien muss ein Expertensystem erfüllen, um sich von einer normalen Datenbank zu unterscheiden.
Es muss also ähnlich wie in einer Datenbank das Wissen des Experten enthalten sein. Den großen Unterschied macht die Ablage des Wissens in der sogenannten Wissensbasis und seine Verarbeitung mit Hilfe der sogenannten Inferenzmaschine (vgl. Kap. 2.2.2.). So muss ein Expertensystem ähnlich wie ein Experte fähig sein, einen Lösungsweg zu verfolgen und dabei auf die Eingaben des Anwenders flexibel zu reagieren. Das Expertensystem muss demzufolge wie der menschliche Fachmann eine Strategie enthalten, die es ihm ermöglicht, auf Eingaben zu reagieren und seine Fragen daraus folgend so zu stellen, dass nur sinnvolle Fragen gestellt werden, die auch zur Schadenklärung beitragen und die Schadenart und –ursache genauer eingrenzen. Fragen, von denen klar ist, dass sie nicht mehr relevant sind, dürfen nicht auftauchen.

Die entscheidenden Stichworte bei Expertensystemen sind also Problemlösungsverhalten und logische Schlussfolgerungen, die in den Bereich der Intelligenz fallen, weswegen Expertensysteme zum Gebiet der Künstlichen Intelligenz gezählt werden.

2.2.1. Künstliche Intelligenz

Expertensysteme sind ein Teilgebiet der Künstlichen Intelligenz, mit deren Erforschung Mitte der Fünfziger Jahre begonnen wurde. Es ist ein alter Traum der Menschheit, Intelligenz bzw. intelligente „Wesen“ künstlich zu erzeugen („artificial intelligence“). Im späten 18. Jahrhundert schien es Wolfgang von Kempelen zum erstenmal gelungen zu sein mit seinem Schachautomaten Intelligenz und Automation zu verbinden. Erst Jahre später wurde entdeckt, dass ein schachspielender Liliputaner in dem „Automaten“ versteckt war, der dessen hölzerne Puppe über ein Hebelwerk bediente. Er musste angeblich niesen, so dass das Geheimnis der künstlichen Intelligenz ans Licht kam [28, 29].

Künstliche Intelligenz wird von Tolle folgendermaßen definiert [30]: „Künstliche Intelligenz bedeutet nicht nur die Abarbeitung von Wenn-Dann-Regeln, sondern die Nachbildung der menschlichen Intelligenz insgesamt.“ Diese Forderung impliziert die Frage, was man unter menschlicher Intelligenz zu verstehen hat. Sie ist nur sehr schwer zu beantworten, weswegen es auch nur wenige Versuche gibt. Einer davon ist: „Unter Intelligenz wird die Fähigkeit oder das Vermögen verstanden, Zusammenhänge zwischen einer Vielzahl von Faktoren auf kürzestem Wege zu erkennen.“ [31].

Ziel der künstlichen Intelligenz im Bereich der Expertensysteme ist es also nicht, wie in einer Datenbank ein riesiges Wissen zusammenhanglos anzuhäufen, sondern es soll versucht werden, dieses Wissen auf neue, nicht vorhersehbare Ereignisse automatisch zu übertragen und somit zur richtigen Lösung zu gelangen.

Die Künstliche Intelligenz lässt sich in vier große Hauptgebiete gliedern, wobei es unter den verschiedenen Autoren Abweichungen gibt. Gevarter teilt sie gemäß Abbildung 6 ein.

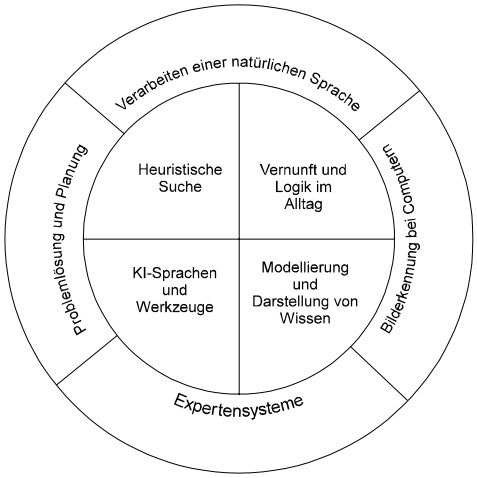


Abbildung 6: Teilbereiche der künstlichen Intelligenz [nach 11, 25]

In dem Bereich „Problemlösung und Planung“ werden alle Aufgaben zusammengefasst, die einer intelligenten Konfigurierung bedürfen. Dabei ist es das Ziel, aus mehreren Objekten ein Konstrukt zu bilden, das bestimmte Randbedingungen erfüllt. Ein Beispiel dafür ist die Konfiguration eines für eine spezielle Aufgabe optimierten Computers aus mehreren zur Wahl stehenden Elementen.
Gemäß Abbildung 6 sind zwei weitere zukunftsträchtige Gebiete der Künstliche Intelligenz die Bild- und Spracherkennung sowie -verarbeitung, von denen man sich vor allem eine deutliche qualitative Verbesserung der Kommunikationsmöglichkeiten zwischen Mensch und Maschine erhofft. Die betroffenen Anwendungsgebiete sind sehr vielschichtig und reichen von Multimediaanwendungen im PC-Bereich bis zu intelligenten Sichtsystemen für den Straßenverkehr, die im Rahmen des europäischen Forschungsprogramms PROMETHEUS erforscht werden oder der Spracherkennung im Bereich des „Telephon-Banking“ [32, 33]. Für diese Zwecke werden vor allem Versuche mit Neuronalen Netzen gemacht, die mit vielen Tausenden von Prozessoren ausgerüstet sind, die untereinander komplex verbunden und in der Lage sind, „Parallelverarbeitungen“ vorzunehmen [157]. Sie sind zwar aufgrund ihrer Möglichkeit der parallelen Informationsverarbeitung sehr leistungsfähig, aber auch sehr komplex [34, 35, 36, 37]. Deswegen werden nur langsame Fortschritte erzielt, die von einem Serieneinsatz noch weit entfernt sind.
Expertensysteme als viertes Gebiet werden im folgenden Abschnitt eingehender behandelt.

Die Künstliche Intelligenz befindet sich heute immer noch auf der Stufe der Einzelentwicklungen in den genannten Bereichen. Dabei zeichnet sich der Trend ab, dass in Zukunft die Weiterentwicklung weniger eine Frage der Rechnerleistungsfähigkeit sein dürfte, als vielmehr eine Frage geeigneter Denkstrukturen zur Wissensmodellierung [38].

2.2.2. Aufbau von Expertensystemen

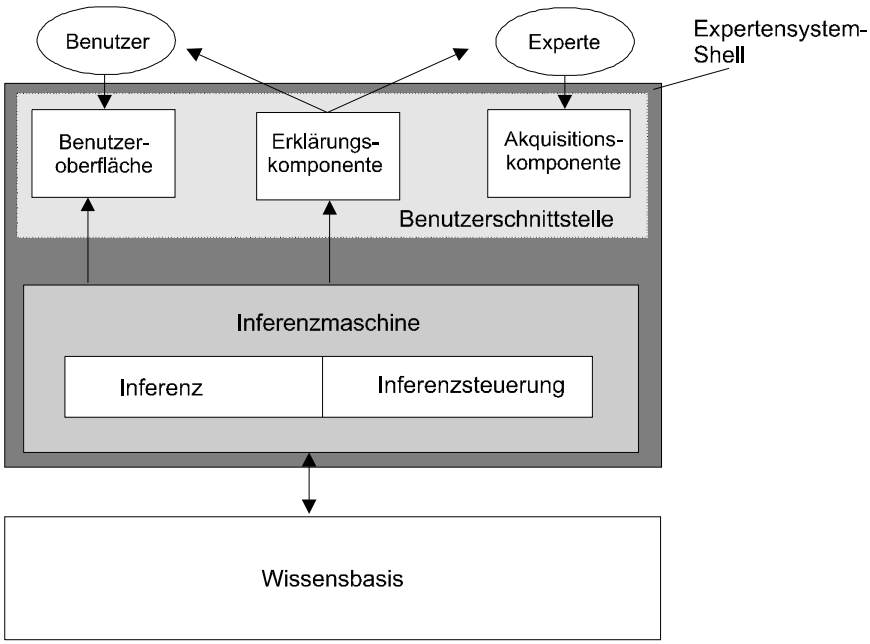


Abbildung 7: Architektur eines Expertensystems [26, 39]

Jedes Expertensystem beinhaltet die drei Hauptkomponenten:

- Wissensbasis
- Inferenzmaschine
- Benutzerschnittstelle

Wissensbasis

In der Wissensbasis ist das gesamte Wissen, das ein Expertensystem zur Verfügung hat, enthalten. Es ist fast immer in der Form einfacher Produktionsregeln gespeichert. Eine andere Art der Wissensrepräsentation ist die objektorientierte Wissensspeicherung, während besonders leistungsfähige Systeme fähig sind, die eingegebenen Fakten und Zusammenhänge in einer gemischten Form von Regeln und Objekten abzulegen. Es handelt sich dabei um die sogenannten „Hybriden Systeme“ (vgl. Kap. 2.2.4.).

Inferenzmaschine

Der Inferenzmaschine obliegt die Verknüpfung der eingegebenen fallspezifischen Daten mit dem in der Wissensbasis gespeicherten Wissen. Im Normalfall funktioniert dies über eine Wenn-Dann-Regel. Der Inferenzmechanismus nimmt einen Vergleich der Daten mit den enthaltenen Regeln vor. Falls er feststellt, dass eine bestimmte Regel erfüllt ist, wird diese Regel gefeuert, das heißt, dass der Aktions- oder Dann-Teil der Regel ausgeführt wird.
Die Inferenzmaschine ist aber nicht nur ein einfacher Komparator, sondern erfüllt noch einige weitere wichtige Aufgaben. Sie bildet die Zentrale eines jeden Expertensystems. Sie hat festzulegen, wann welche Teile des Expertensystems in welcher Weise aktiviert werden sollen.

Weiterhin legt sie fest, welche Regeln berücksichtigt und in welcher Reihenfolge sie überprüft werden sollen. Dabei kann sie sich einer bedeutenden Zahl verschiedener Strategien bedienen, auf die später noch eingegangen werden soll (vgl. Kap. 5.4. „Die Inferenzmaschine“). Ein dritter Aspekt, der von der Inferenzmaschine gesteuert wird, ist der Dialog mit dem Benutzer. Sie entscheidet, wann und welche Daten eingegeben werden müssen. Außerdem teilt sie dem Anwender das Ergebnis seiner Anfrage mit.

Benutzerschnittstelle

Die Benutzerschnittstelle teilt sich wiederum in drei Einzelteile auf, die zu verschiedenen Zwecken benötigt werden:

- Akquisitionskomponente
- Benutzeroberfläche
- Erklärungskomponente

Die Akquisitionskomponente wird auch als Wissenserwerbskomponente bezeichnet und hat den Sinn, dem Systementwickler die Eingabe des Wissens zu ermöglichen und zu vereinfachen. Je größer die Unterstützung durch diesen Teil des Expertensystems ist, desto besser kann er sich auf eine sinnvolle Strukturierung des Wissens konzentrieren, da er von der reinen Programmiertätigkeit entlastet wird [40].
Von der Akquisitionskomponente ist neben der gewählten Wissensrepräsentation abhängig, wie hoch der Pflegeaufwand eines Expertensystem ist. Darunter versteht man den Aufwand, der bei Erweiterungen oder Anpassungen des Systems auftritt. Wenn diese Änderungen einfach zu handhaben sind, können Wissensaktualisierungen leicht ohne Datenverarbeitungsspezialisten vorgenommen werden. Im anderen Falle entstehen selbst bei geringfügigen Änderungen erhebliche Kosten.

Die Gestaltung der Benutzeroberfläche ist in beträchtlichem Maße für die Akzeptanz eines Systems durch den Benutzer verantwortlich. Sie ist dafür zuständig, den Anwender nach Daten zu fragen und ihm Ergebnisse mitzuteilen. Außerdem ermöglicht sie ihm, die Sitzung nach seinen Erfordernissen zu steuern. Je übersichtlicher sie ist und je einfacher die Bedienung ist, desto leichter ist die Einarbeitung. Die Eingabe der Antworten sollte möglichst fehlerfrei möglich sein. Bei dem heutigen Stand der Technik bieten sich dafür „Ja/Nein“- oder Multiple-Choice-Fragen an, da eine völlig natürlichsprachliche Kommunikation zwischen Anwender und System zumindest bei komplexen Problemen noch nicht möglich ist.

Hauptaufgabe der Erklärungskomponente ist die Information des Benutzers über den Sinn einzelner Fragen. Sie soll ihm den Zweck der Fragen und ihren Zusammenhang mit anderen Fragen erklären, damit er die verschiedenen Antwortmöglichkeiten nicht isoliert betrachtet und den richtigen Schluss ziehen kann. Im Fall der Schadenanalyse sollte sie die einzelnen Antwortmöglichkeiten genauer beschreiben und, wenn möglich, optisch durch charakteristische Schadenbilder unterstützen.

2.2.3. Wissensarten

Bevor man beginnt, menschliches Wissen in Form von Daten auf dem Rechner abzulegen, muss man klären, welche Wissensarten es gibt, nach denen das vorliegende Gebiet eingeteilt werden kann.

Die einfachste Wissensart ist das Faktenwissen wie zum Beispiel, dass ein Merkmal der Schwingungsrisskorrosion Risse sind. Es handelt sich um deskriptives, also realitätsbeschreibendes Wissen. Dabei werden physische Objekte in gedankliche Informationsobjekte im Gehirn des Fallbearbeiters abgebildet [11].

Faktenwissen wird durch Relationswissen [26] verknüpft, was die Grundlage zur Ableitung neuen Wissens darstellt [20]. Wie ein Experte sein Relationswissen einsetzt, ist die entscheidende Frage, die den großen Unterschied zwischen den einzelnen Fachleuten ausmacht. Trotz des gleichen Wissensstandes müssen zwei Experten nicht auf die gleiche Weise vorgehen und auch nicht zum gleichen Schluss kommen. Dieses Wissen über den richtigen Kenntniseinsatz wird Strategiewissen genannt. In der Sprache der Expertensysteme wird es auch als Kontroll- oder Metawissen bezeichnet [41]. Bei den letzten beiden Wissensarten handelt es sich um Denkanweisungen, wie gedankliche Informationsobjekte zu verknüpfen sind. Sie haben folglich prozeduralen Charakter.

Diese Klassifikation könnte noch beliebig erweitert oder auch unter völlig anderen Gesichtspunkten durchgeführt werden. Dabei muss jedoch das Ziel berücksichtigt werden, dass das menschliche Wissen so gegliedert werden soll, dass es auf eine rechnerlesbare Systematik portiert werden kann. Deswegen bietet sich die oben getroffene Einteilung für ein Expertensystem an, da die Wissensbasis aus zwei Teilen besteht. Der *Database*, in der das deskriptive Wissen gespeichert ist, und der *Metabase*, die das prozedurale Wissen, also die Verknüpfung der Wissensstücke, enthält.

Bei dieser Übertragung der gedanklichen Ebene auf eine Modellebene darf nicht übersehen werden, dass eine vollständig realitätstreue Abbildung nicht möglich ist. Der Teil, der dabei verloren geht, wird als KI-Lücke bezeichnet [20]. Sie beruht darauf, dass ein reales System aus einer „offenen“ in eine „geschlossene“ Welt abgebildet wird, deren Detaillierungsgrad und -umfang durch den ES-Entwickler determiniert ist [42]. Dabei müssen zwangsweise bestimmte Abstraktionen vorgenommen werden, da das System sonst unter Umständen bereits in Details so umfangreich wäre, dass es die Rechner- und Entwicklerkapazität leicht überschreiten könnte. Ein Beispiel dafür ist die Implementierung des Verhaltens verschiedener Werkstoffe gegenüber verschiedenen Konzentrationen einzelner Medien, da sich aufgrund der großen Anzahl von möglichen Werkstoffen und Medien eine unendliche Liste ergibt, deren Aufnahme den Systemrahmen sprengen würde.

Das Ziel jeder Wissensrepräsentation ist es, diese Informationsreduktion möglichst zu minimieren.

2.2.4. Möglichkeiten der Wissensmodellierung

Wissensmodellierung oder Wissensrepräsentation ist der Versuch, das menschliche Wissen in einer Wissensbasis abzulegen oder nachzubilden. Es wird dabei versucht, die menschlichen Denkstrukturen für den Rechner imitierbar zu machen. Dazu gibt es drei grundsätzliche Möglichkeiten:

- Logik
- Produktionsregeln
- Objekte

Diese drei stellen jedoch nur die grundlegenden Arten dar, während in modernen Wissensmodellierungen oft Mischtypen verwendet werden, die fließend ineinander übergehen, wie Abbildung 8 zeigt.

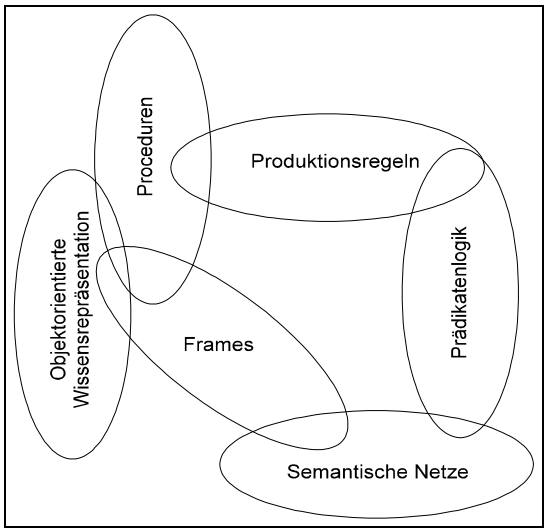


Abbildung 8: Fließende Übergänge von Wissensrepräsentationsarten [nach 43]

Während eine Regel der Prädikatenlogik nur vom Zustand einer Aussage A auf das Verhalten einer anderen Aussage B schließen lässt, handelt es sich bei einer Produktionsregel um eine deutliche Erweiterung, da die beiden Teile, aus der sie besteht, erheblich variabler und umfangreicher gestaltet werden können. Produktionsregeln sind besser unter dem Namen Wenn-Dann-Regeln bekannt, in deren Wenn- oder Prämissenteil nicht nur reine Aussagen oder Daten enthalten sein können, sondern auch Funktionen und Operatoren, die vor der Regelanwendung unter Umständen noch bestimmte Datenmanipulationen vornehmen [44]. Auch der Dann- oder Aktionsteil ist sehr flexibel anwendbar. Neben der Zuweisung von Werten kann er auch Daten löschen oder hinzufügen und bestimmte Aktionen, wie Auslösen von Sprüngen oder Starten des Speichervorganges, ausführen. Diese flexible Steuerungsmöglichkeit, die einen Zugriff auf das System zulässt, ist die Grundlage von Expertensystemen, da sie die Eingabe von Metawissen zulässt.

Ein Beispiel für eine Produktionsregel zeigt Abbildung 9:

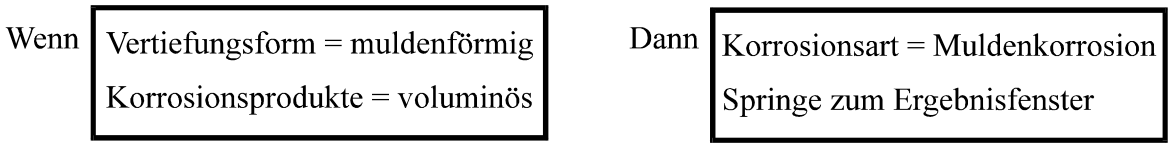


Abbildung 9: Produktionsregel

Trotzdem die Regeln in einer bestimmten Form geschrieben werden müssen, damit der Rechner sie lesen kann, ist diese Notation schon bedeutend benutzerfreundlicher als die Aussagen der Prädikatenlogik. Zudem sie relativ leicht decodiert und verstanden werden kann, was den Wartungsaufwand erheblich reduziert. Aufgrund dieser einfachen Handhabbarkeit von Produktionsregeln, die auch dadurch unterstützt werden, dass Experten ihr Wissen am leichtesten in der Wenn-Dann-Form formulieren können, werden sie in fast allen Expertensystemen angewandt.
Dennoch sind Produktionsregeln oft sehr unhandlich und deswegen ungeeignet, „Folgerungen über die fundamentalen Zusammenhänge der betrachteten Phänomene zu ziehen“ [45]. Das bedeutet, dass man, um die Relationen zwischen einzelnen Handlungsobjekten und -subjekten eines Produktionssystems möglichst einfach darstellen zu können, eine andere Wissensrepräsentationsart benötigt.
Da jedoch Produktionsregeln zur Abbildung von Wissen unerlässlich sind, führt dies zu den modernen hybriden Wissensmodellierungen, die sowohl mit Regeln, als auch mit Objekten arbeiten können. Sie ermöglichen es somit, die Vorteile der Produktionssysteme mit denen der Objektorientierung zu vereinen.

Ein Vorläufer der Objekte ist das semantische Netz [46]. Dabei handelt es sich aber nicht um eine eigenständige Wissensrepräsentationsform, sondern nur um eine graphische Darstellungsmethode objektorientierter Wissensrepräsentation, wenngleich auch hier Einschränkungen bestehen [26, 47, 48]. Es ging aus dem Wunsch hervor, die Bedeutung natürlicher Sprache bzw. abstrakter prädikatenlogischer Ausdrücke graphisch darzustellen [49].
Im Mittelpunkt der Objektorientierung stehen, wie der Titel schon sagt, die Objekte. Sie besitzen Eigenschaften in Form von Daten und können Handlungen in Form von Methoden, die Prozeduren und Funktionen enthalten, ausführen [50].
Es handelt sich dabei um Elemente, die in einem Anwendungsbereich von Bedeutung sind. Beispielsweise werden in einem Programm, in dem verschiedene Werkstoffe benötigt werden, die einzelnen Materialien wie Stahl, Aluminium, Polyamid oder Steingut als Objekte definiert. Um diese genauer beschreiben zu können, bedient man sich der sogenannten Properties oder Eigenschaften, die in beliebiger Anzahl einem Objekt zugeordnet werden können. Zum Beispiel könnte man den Objekten zur genaueren Bestimmung die Attribute Zugfestigkeit, Härte, elektrische Leitfähigkeit und Wärmeausdehnungskoeffizient zuordnen. Die Auswahl der Eigenschaften hängt vom Anwendungsgebiet ab. Falls das Programm in der Elektroindustrie eingesetzt werden soll, bieten sich die elektrischen Kennwerte an, während im Stahlbau die mechanischen zum Einsatz kommen. Um die Wissensbasis übersichtlicher zu gestalten und die Wissensabfrage zu erleichtern, können verschiedene Objekte, die bestimmte Gemeinsamkeiten aufweisen, noch in Klassen eingeteilt werden. So könnten zum Beispiel Zink,

Aluminium und Kupfer in der Klasse Nichteisenmetalle oder Polyamid, Polyethylen und Polystyrol in der Klasse Kunststoffe zusammengefasst werden (vgl. Abb. 10).

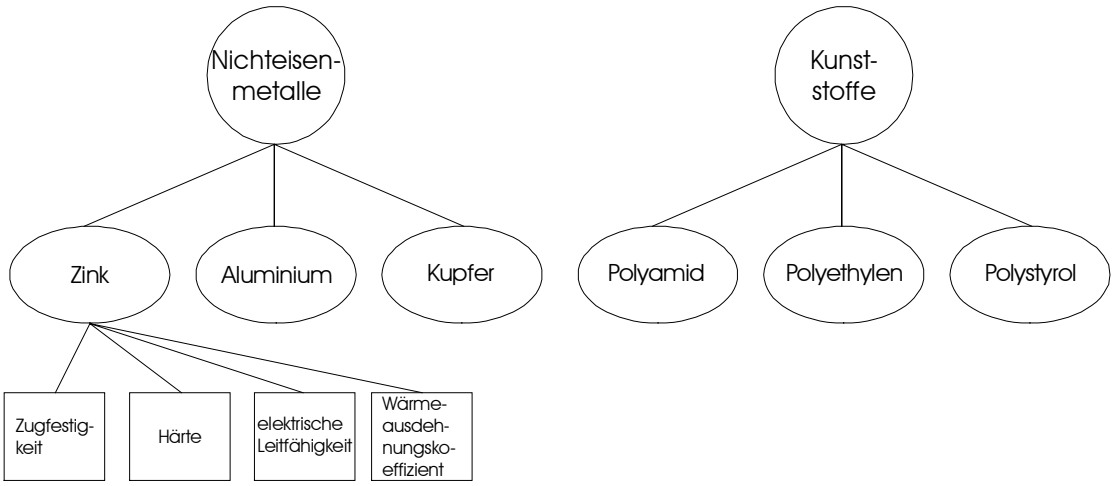


Abbildung 10: Beispiel einer Objektstruktur

Dieses beispielhafte Schema kann auf sämtliche Anwendungsgebiete übertragen werden, wobei jedoch ein mehr oder weniger starker Abstraktionsgrad berücksichtigt werden muss.
Je greifbarer und konkreter ein System wie zum Beispiel das des angeführten Werkstoffprogramms ist, desto einfacher kann eine Umsetzung in eine Objektstruktur vorgenommen werden.

Objekte sind fähig, sowohl deklaratives Wissen in Form von datengefüllten Slots als auch prozedurales Wissen in Form von Methoden zu aggregieren [36]. Slots sind Objekt-Eigenschafts-Paarungen, die einen bestimmten Wert haben. Methoden sind dabei an bestimmte Slots gekoppelt und werden bei deren Aufruf oder Veränderung aktiv. Sie können interne Aktionen, wie zum Beispiel die Speicherung von Zwischenergebnissen, aufrufen oder auf externe Programme, beispielsweise Datenbanken, zugreifen.
Diese Methode der Programmierung stellt einen großen Fortschritt in der Softwareentwicklung dar. Die Gründe hierfür sind sehr breit gestreut und liegen hauptsächlich in einer Vereinfachung der Programmierarbeit, einer besseren Wiederverwendbarkeit des bereits erstellten Codes und der daraus folgenden Verminderung des für Software benötigten Speicherplatzes.

Mit diesem kurzen Überblick soll nicht auf Details der einzelnen Wissensrepräsentationen eingegangen, sondern lediglich eine Einführung gegeben werden, die es dem Leser ermöglicht, die Erstellung der rechnergestützten Schadenanalyse in Kap. 5. zu verstehen. Genaue programmiertechnische Einzelheiten werden nicht betrachtet, da dies den Rahmen der Arbeit sprengen würde.

2.2.5. Hilfsmittel der Expertensystementwicklung

Bevor die Betriebswirtschaft in die Produktions- und Montagehallen der Fabriken Einzug gehalten hat, wurden mit Hilfe von Standardwerkzeugmaschinen wie Bohr-, Fräs-, Hobel- oder Drehmaschinen sämtliche Arbeiten erledigt. Dabei waren teilweise sehr komplizierte

Ein- und Umspannungen nötig, die die Rüstzeiten und somit die Kosten beträchtlich erhöhten. Dafür konnte auf diese Weise jedes Fertigungsproblem gelöst werden.
Mit der wirtschaftlichen Betrachtung kamen auch Spezialwerkzeuge, die in der Lage waren, ein bestimmtes Bauteil schneller und präziser herzustellen als mit den Standardwerkzeugen. Sie waren für hohe Stückzahlen eines Teiles geeignet, was eine deutliche Kostenreduzierung, aber auch eine erhebliche Flexibilitätseinschränkung bedeutete. Es konnten nicht mehr beliebige Teile gefertigt werden, da eine Änderung des Produktionsprogramms einen großen Umrüstaufwand erforderte oder unter Umständen mit derartigen Maschinen nicht mehr bewältigt werden konnte.
Mit der ständigen Fortentwicklung der Produktionsverfahren und der Steuerungsmöglichkeiten gelang es, sogenannte Bearbeitungszentren zu bauen, die sämtliche Produktionsschritte an einem Bauteil mit maximal zwei Einspannungen bewerkstelligen können. Diese Maschinen sind CNC gesteuert und können für jede Aufgabe relativ schnell umprogrammiert werden, während sie andererseits in der Lage sind, eine einmal gespeicherte Spezialanwendung beliebig oft auszuführen. Somit sind sie gleichzeitig flexibel und wirtschaftlich. Ihr Nachteil sind der im Gegensatz zu den anderen Maschinen sehr hohe Anschaffungspreis und die höheren Unterhaltskosten.

Ähnlich wie bei diesem anschaulichen Beispiel aus dem Maschinenbaubereich verhält es sich auch im Bereich der Expertensystem-“Produktion“. Anfangs wurden zur Programmierung nur Programmiersprachen verwendet, die im Laufe der Zeit in Hinsicht auf die verschiedenen Arten der Expertensystem-Enwicklung verbessert wurden. Mit ihnen kann jede Art von Expertensystem entwickelt werden, egal zu welchem Themengebiet es gehört. Sie sind also sehr flexibel, aber auch sehr zeitaufwendig, da jeder Schritt einzeln eingegeben werden muss und zur effektiven Programmierung hervorragende Sprachkenntnisse und Erfahrung im Umgang mit den Sprachelementen nötig sind [31].
Deswegen wurden die ersten Werkzeuge entwickelt, die zum Beispiel schon einen Regeleditor hatten oder andere Komponenten wie graphische Oberflächen oder eine Inferenzmaschine enthielten, die bereits fertig vorprogrammiert waren und nur noch eingesetzt werden mussten, wobei aber immer noch ein Großteil der Programmierung über eine Programmiersprache erfolgte [26, 37]. Diese Systeme stellen eine preiswerte und bedeutend wirtschaftlichere Alternative im Vergleich zu den reinen Sprachen dar.
Die „Bearbeitungszentren“ der Expertensystem-Entwicklung sind die Entwicklungsumgebungen. Es handelt sich dabei um umfangreiche Softwarepakete, die auf Basis einer Programmiersprache erstellt worden sind und dem Anwender alle Möglichkeiten bieten, ein Expertensystem zu entwickeln, ohne Standardvorgänge ständig neu programmieren zu müssen. Sie arbeiten mit graphischen Hilfsmitteln und Eingabehilfen, die es dem Wissensingenieur ermöglichen, ein Expertensystem zu erstellen, ohne mit der Programmiersprache direkt in Berührung zu kommen. Andererseits können sprachkundige Programmierer problemlos im Quellcode der Entwicklungsumgebung ihre Wünsche verwirklichen. Sie vereint also die Flexibilität einer Sprache mit der Wirtschaftlichkeit von Standardmodulen. Auch hier stellt der hohe Preis den größten Nachteil dar.

Die höchstentwickelten Werkzeuge sind die Expertensystemshells, die als Expertensystem ohne Wissen aufgefasst werden können [48]. Sie entstanden dadurch, dass man dem fertigen Expertensystem Mycin, dessen Wissensbasis mit medizinischem Wissen gefüllt war, dieses Wissen entzog, während die Inferenzmaschine und die Benutzerschnittstelle beibehalten wurden und für eine mit anderem Wissen gefüllte Wissensbasis verwendet werden konnten. Dieses System wurde als Abkürzung von „Empty Mycin“ EMYCIN getauft.
Folglich wurden diese Systeme von Curth folgendermaßen definiert:
„Programmtechnisch versteht man darunter weitgehend vorgefertigte, verallgemeinerte Systemlösungen, die durch Hinzufügen von anwendungsspezifischem Wissen zu einem konkreten Expertensystem komplettiert werden müssen.“ [48]
Viele dieser alten Shells sind aufgrund ihrer Entstehungsart sehr unflexibel und nur für bestimmte Anwendungsgebiete geeignet, zu denen hauptsächlich Diagnostik, Konstruktion und Simulation zählen [51]. Diese Konzentration auf einen bestimmten Problemlösungstyp ist bei modernen Shells wie zum Beispiel Nexpert Object (vgl. Kap. 5.4.) nicht mehr feststellbar. Vielmehr ist es das Ziel, offene Werkzeuge zu erstellen, die für viele unterschiedliche Anwendungsgebiete einsetzbar sind und somit den Entwicklungsumgebungen näher stehen als den ursprünglichen Shells, wobei sie jedoch einen Hauptvorteil haben, der darin besteht, dass der ES-Entwickler keinerlei Programmierkenntnisse und -erfahrungen haben muss, sondern sich voll auf die Wissensstrukturierung und die Entwicklung der Inferenzstrategien konzentrieren kann.

2.3. Systematisierung der Korrosion

Es gibt viele Möglichkeiten die Korrosion zu systematisieren, wobei die jeweilige Systematik von der Zielvorgabe abhängig ist.
Die meistverwendete Systematisierung ist die Einteilung nach Korrosionsarten. Dabei wird zwischen solchen mit und solchen ohne mechanische Belastung unterschieden. Beispiele dafür finden sich bei Lange, Baumann, Mürbe, Grosch und Broichhausen [5, 6, 52, 53, 54]. Die einzelnen Korrosionsarten werden entsprechend ihres Entstehungsmechanismus und ihrer Schadenkennzeichen aufgelistet. Eine weitergehende Verknüpfung der einzelnen Merkmale und Mechanismen zwischen den Schadenarten wird nicht vorgenommen, weswegen es sich weder um ein Modell noch um eine tiefgreifendere Systematik der Korrosion handelt.

Ein vom TÜV [55] und der DECHEMA verfolgter Ansatz ist die Gliederung nach Werkstoff/Mediumspaarungen [143]. Dabei werden Erfahrungswerte über das Verhalten eines bestimmten Mediums gegenüber verschiedenen Werkstoffen gesammelt, die auf neue Schäden übertragen werden. Es handelt sich weniger um eine Systematik, als mehr um eine Datensammlung, da wenige Daten eines Schadens zur Klärung der Ursache verwendet werden. Ein Mangel dieser Methode zeigt sich darin, dass Korrosion oft auch in Medien auftritt, in denen der Werkstoff eigentlich beständig sein müsste.

Ein Versuch einer Systematisierung findet sich unter anderem bei Lange. Er stellt zwar ebenfalls keine Verbindungen zwischen den einzelnen Korrosionsarten her, gibt jedoch folgende Parameterliste an, mit der ein Korrosionsschaden beschrieben werden kann:

Werkstoff
Chemische Zusammensetzung
Gefügezustand
Oberflächenzustand

Medium
Chemische Zusammensetzung
Zahl der Phasen
Bewegungszustand
Elektrochemische Bedingungen
Kontinuität der Mediumeinflussgrößen
Temperatur
Einwirkzeit, Zyklendauer, Zyklenzahl

Mechanische Belastung
Äußere Spannungen
Eigenspannungen
Belastungsänderungen
Flüssigkeitsströmung
Erosion
Wassertropfen, Blasenimplosion
Reibung

Abbildung 11: Parameter für die Korrosion in einem System aufgrund Eigenschaften des Werkstoffes, des Mediums und mechanischer Belastung [6]

In dieser Systematisierung findet sich trotz ihrer Mängel bereits die Einteilung in die drei großen Bereiche, die zur Klärung eines Korrosionsschadens wichtig sind und berücksichtigt werden müssen: Werkstoff, Medium und Mechanische Belastung.

Eine weitere beachtenswerte Liste von Punkten, die bei der Korrosionsschadenbetrachtung berücksichtigt werden sollte, stellt Wranglen auf [56]:

- Korrosionsmedium
- Korrosionsmechanismen
- Korrosionsarten
- Metalle
- Anwendungsgebiet oder Industriezweig

Dabei handelt es sich aber weniger um eine Systematik, als um eine Aufstellung, welche verschiedenen Einflussgrößen nacheinander betrachtet werden müssen, um ein Korrosionssystem in seiner Gesamtheit erfassen zu können.
Eine entsprechende Systematik stellt Tödt in sehr umfangreicher Weise nach den gleichen Gesichtspunkten auf, wobei auch hier keine Verknüpfungen der einzelnen Systematiken besteht [57].

Einen ähnlichen Ansatz verfolgt die DIN 50930, die sich mit der Korrosionswahrscheinlichkeit von wasserdurchströmten Rohren beschäftigt. Sie beginnt ebenfalls mit einer Einteilung

der Korrosionsarten nach mechanischer Belastung und führt danach den Einfluss von Werkstoff-, Wasserbeschaffenheit und von Konstruktion, Verarbeitung und Betriebsbedingungen auf [58]. Es handelt sich jedoch nur um eine Aufzählung von Einflussgrößen, die den Anwender über den Stand der Korrosionsforschung auf diesem Gebiet informiert. Es wird ihm keine aktive Hilfe in Form eines Weges, der zu einer bestimmten Schlussfolgerung führt, gegeben. Dennoch stellt sie einen sehr guten systematischen Ansatz dar, dessen Einteilung berücksichtigt werden muss, und der zahlreiche Anhaltswerte enthält, die für eine systematische Schadenanalyse im Bereich der Korrosion verwendet werden können.

Zur Detektion einer Korrosionsart anhand des Schadenbildes ohne Berücksichtigung des Schadenmechanismus dient die VDI 3822 Blatt 3 [59]. Es handelt sich dabei um eine Matrix, die die Kennzeichen einer Schadenart entsprechend ihrer Untersuchungsschritte einteilt. Diese Aufbereitung stellt eine echte Systematik dar, die jedoch noch einige Schwachpunkte enthält (vgl. Kap. 5.5.).

Zusammenfassend lässt sich also feststellen, dass man im Bereich der Korrosion bis jetzt keine durchgängigen Ansätze einer Systematisierung findet. Es gibt kein System, das ausgeprägte Vernetzungen zwischen den einzelnen Korrosionsarten oder Verknüpfungen der verschiedenen Einflussgrößen der Korrosion enthält. Somit stehen die Korrosionsarten mehr oder weniger zusammenhanglos nebeneinander, womit die bestehenden Systematisierungsansätze kein allgemeingültiges Korrosionsmodell enthalten, das sowohl die Korrosion übersichtlicher macht als auch die Grundlage eines Rechnereinsatzes darstellt.

2.4. Bestehende Rechnersysteme im Bereich der Korrosion

Im Bereich der Korrosion gibt es bereits mehrere Expertensysteme, von denen das Informationssystem Coris, das von den Firmen Bayer, Hoechst und Krupp-VDM in Zusammenarbeit mit der DECHEMA e.V. entwickelt wurde [60, 61], derzeit das umfangreichste ist. Es handelt sich dabei jedoch nicht um ein reines Expertensystem, sondern um mehrere lauffähige Systembausteine auf der Basis von drei relationalen Faktendatenbanken, einer Literaturdatenbank sowie zwei Expertensystemen.
Die Korrosionsdatenbank enthält über 30000 Datensätze über das Korrosionsverhalten metallischer Werkstoffe in wässrigen Lösungen von Säuren, Basen und Salzen [60, 62]. Die Stoffdatenbank enthält von ca. 600 Medien bis zu 50 thermophysikalische Eigenschaften je Medium, die in etwa 5500 Tabellen und knapp 40000 Datentupeln aufbewahrt werden [63]. Des weiteren befinden sich in der Werkstoffdatenbank Soll-Werkstoff-Daten massiver metallischer Werkstoffe und zusätzliche Informationen über physikalische Kennwerte [64], während die enthaltene Korrosions-Literaturdatenbank die derzeit umfangreichste ist und über 70000 Abstracts und einen zweisprachigen Korrosions-Thesaurus umfasst [65].
Die beiden Expertensysteme wurden mit dem Entwicklungswerkzeug Nexpert Object entwickelt. Das eine dient der Werkstoffauswahl, Werkstoffüberprüfung und zur Schadenanalyse von Werkstoffen, die in schwefelsauren Medien eingesetzt werden [66]. Das zweite ist für die Werkstoffüberprüfung und -auswahl hinsichtlich chloridinduzierter Lochkorrosion [67] gedacht. Die relationale Faktendatenbank wurde mit ORACLE und die Literaturdatenbank mit

TRIPS von PSI erstellt. Sämtlich Komponenten wurden unter einer Windows-Oberfläche zusammengefasst, um die Einheitlichkeit des Systems zu unterstreichen und eine leichte Benutzbarkeit zu erreichen. Um eine automatische Kommunikation und Interaktion der einzelnen Module zu gewährleisten, wurde darauf geachtet, dass die Begriffs- und Objektdefinitionen übereinstimmen [60]. Bei der Programmierung wurde Wert darauf gelegt, dass die Systeme erweiterbar sind.

Eine Art Vorläufer von Coris ist die ebenfalls von der DECHEMA entwickelte Korrosionsdatenbank KODABA, die sich hauptsächlich mit der Werkstoffeinsatzplanung beschäftigt. Es handelt sich dabei um ein DOS-basiertes System, das anhand der Eingabe des Werkstoffes und des Korrosionsmittels entscheidet, ob diese Paarung für den Einsatz geeignet, bedingt oder nicht geeignet ist. Zur Beschreibung von Korrosionsvorgängen bedient es sich folgender Informationen:

- Quelle (Literaturzitat, Laborjournal)
- Eigenschaften des Korrosionsmittels
- Eigenschaften des Werkstoffes
- Versuchsbedingungen
- Ergebnisse [17]

Die wissensbasierten Komponenten dieser Systeme, die über Literatur- und Faktendatenbanken hinausgehen, behandeln immer relativ begrenzte Einsatzgebiete, so dass sie nur in speziellen Fällen angewandt werden können.
Ein weiteres derartiges Expertensystem ist das an der Märkischen Fachhochschule im Labor für Korrosionsschutztechnik entwickelte Corros, das sich zum Ziel gesetzt hat, die sehr ausführliche DIN 50930 Teile 1-4 in Form eines wissensbasierten Systems aufzubereiten [68, 69]. Diese Norm beschäftigt sich mit dem Korrosionsverhalten von metallischen Werkstoffen im Inneren von Rohrleitungen, Behältern und Apparaturen bei Korrosionsbelastung durch Wässer, wobei sie sich im speziellen mit un-/niedriglegierten Stählen, feuerverzinkten Stählen, nichtrostenden Stählen, Kupfer und Kupferlegierungen auseinandersetzt [58]. Hier wird keine Begrenzung auf eine bestimmte Korrosionsart, sondern auf eine bestimmte Anwendung vorgenommen. Das Ziel ist die Vorhersage der Wahrscheinlichkeit für das Auftreten schadensträchtiger Erscheinungsformen der Korrosion in wasserführenden Systemen, da diese nach der Verbauung nur unter erheblichem Kostenaufwand direkt inspiziert werden können. Von der Kenntnis derartiger Wahrscheinlichkeiten erhofft man, dass die Wartung bestehender Systeme gezielter durchgeführt werden kann und dass auch für die Konstruktion zukünftiger Anlagen wichtige Verbesserungsmaßnahmen abgeleitet werden können. Zur Programmierung wurde die Expertensystementwicklungsshell TWAICE verwendet, die auf der Programmiersprache Prolog basiert.
Auch hier handelt es sich nur um ein relativ beschränktes Anwendungsgebiet. Da Corros eine reine Umsetzung der in der Norm aufgestellten Zusammenhänge für den Rechnereinsatz ist, kann es ebenfalls nicht für das ganze Spektrum der Korrosion eingesetzt werden.

Bereits Mitte der achtziger Jahre entstand in USA das System CORDIAL (CORrosion Diagnosis Intelligent system for ALuminium), das sich mit der Spannungsrisskorrosion an hochfesten Aluminiumlegierungen beschäftigte. Es berücksichtigt innerhalb einer relativ kleinen Gruppe von Aluminiumwerkstoffen die kritischen Zugspannungen, die Umgebungsbedingungen und den Zeitfaktor. Nach Eingabe der geforderten Größen gelangt das System mit Hilfe einer hybriden Wissensmodellierung zu dem betreffenden Ergebnis. Dabei wurde das deklarative Wissen in objektorientierter Form abgespeichert, während das Strategiewissen mit Hilfe von Regeln abgelegt ist. Das System ist fähig interaktiv während der Sitzung mit dieser Wissensrepräsentation eine logische Lösung zu generieren. CORDIAL ist auf „Knowledge Craft integrated knowledge representation and problem solving environment“ programmiert [70].

Die in diesem Kapitel aufgelisteten Beispiele existierender Expertensysteme macht deutlich, dass es derzeit kein rechnergestütztes System gibt, das den gesamten Bereich der Korrosion in form grundlegender Strukturen abdeckt, sondern nur Insellösungen vorliegen, die sich mit speziellen Korrosionsarten oder speziellen Bauteilen beschäftigen.
Ziel dieser Arbeit ist es deshalb, eine rechnergestützte Schadenanalyse zu realisieren, die nicht nur einzelne Bauteile oder Korrosionsarten behandelt, sondern sich bauteilunabhängig auf die elektrolytische Korrosion von Stählen erstreckt.

3. Systematische Beschreibung der Korrosionsarten

3.1. Vorgehensweise

Die Grundlage einer rechnergestützten Schadenanalyse ist die Analyse des Fachgebietes, das modelliert werden soll. In dieser Arbeit wurde beispielhaft die elektrochemische Korrosion gewählt. Diese Analyse ist notwendig, um feststellen zu können, ob eine Systematisierung und Rechnerunterstützung überhaupt möglich und sinnvoll ist.
Zur Eignungsprüfung der Korrosion wurden die für die Korrosion relevanten Untersuchungsgebiete aufgestellt. Die VDI-Richtlinie 3822 stellt für die Schadenanalyse eine sehr gute Grundlage dar. Sie enthält eine Einteilung in folgende vier Schadenuntersuchungsschritte, die sich in der Überprüfung durch Gutachten und im Gespräch mit Gutachtern [71, 72, 73] als praxisrelevant erwiesen haben:

- Makroskopische Untersuchung
- Lichtmikroskopische Untersuchung
- Elektronenmikroskopische Untersuchung (REM)
- Analytische Untersuchung

Auf die Erläuterung der einzelnen Schritte und die dabei verwendeten Verfahren wurde in dieser Arbeit verzichtet, da dies in einschlägigen Büchern wie [5, 6, 8, 52] bereits sehr detailliert vorgenommen wurde. Zu diesen Untersuchungsschritten wurde noch eine weitere Rubrik „Sonstiges“ aufgenommen, in der Umgebungseinflüsse und besondere Auftretensmerkmale vermerkt wurden, wie beispielweise dass die Interkristalline Korrosion bevorzugt an Schweißnähten auftritt oder welche Maßnahmen zu Ihrer Vermeidung ergriffen werden können.
Als nächstes wurden aus der Vielzahl der Korrosionsarten diejenigen ausgewählt, die in der Praxis häufig auftreten und in der Fachliteratur genau und ausführlich dokumentiert sind, so dass genügend Datenmaterial für ein Expertensystem extrahiert werden konnte. Die Reibkorrosion wurde beispielsweise nicht aufgenommen, da sie zwar häufig auftritt, aber in der Korrosionsliteratur aufgrund der überwiegend mechanischen Anteile dieser Schadenart nur knapp beschrieben wird. Für jede dieser Korrosionsarten wurde ein Datenblatt angelegt (vgl. Abb. 12), das im Rahmen einer Recherche mit den einzelnen Merkmalen, die in den jeweiligen Untersuchungsschritten beobachtet werden können, gefüllt wurde.
Die Recherche stützte sich auf folgende Quellen:

- Literatur
- Schadengutachten
- Expertenbefragungen
- Korrosionssimulationen

Diese Datenblätter dienten zum einen der systematischen Charakterisierung der einzelnen Korrosionsarten in diesem Kapitel und zum anderen waren sie die Grundlage der Relevanzbäume in den Kapiteln 5.5.3. und 5.5.4., die in die rechnergestützte Schadenanalyse implementiert wurden. Dabei wurde bereits hier darauf geachtet, nur signifikante Kennzeichen aufzunehmen, die eine eindeutige Beschreibung der Korrosionsart darstellen, da es darüber hinaus zahlreiche Merkmale gibt, die auf die Feststellung einer Korrosionsart keinen Einfluss haben. Es ist also unerheblich, ob sie vorliegen oder nicht, weswegen sie für das Korrosionsmodell unerheblich sind. Beispielsweise tritt Lochkorrosion bevorzugt an sulfidhaltigen Einschlüssen auf. Da es sich dabei jedoch um sehr kleine Einschlüsse handelt, können diese nach erfolgter Korrosion nur selten nachgewiesen werden, weswegen also das Vorliegen von sulfidhaltigen Einschlüssen nicht eindeutig auf Lochkorrosion hindeutet und somit kein signifikantes Kennzeichen ist, da Lochkorrosion auch an Werkstoffen auftritt, die keine Sulfideinschlüsse aufweisen [56].

Korrosionsart

Makroskopisch:
Lichtmikroskopisch
Elektronenmikroskopisch:
Analytische Untersuchung:
Sonstiges:

Abbildung 12: Datenblatt zur Erfassung der Merkmale der Korrosionsarten

3.2. Korrosionsartenbeschreibung

3.2.1. Gleichmäßige Flächenkorrosion

Technische Gebrauchsmetalle sind durch eine unsystematische Verteilung anodischer und kathodischer Bereiche auf ihrer Oberfläche gekennzeichnet. Falls diese Bereiche nach Ort und Größe homogen verteilt sind, tritt gleichmäßige Flächenkorrosion auf. Dabei erfolgt der Angriff auf der gesamten Fläche, die vom Medium berührt wird, wobei sich eine nahezu gleiche Abtragsrate über dieser Fläche einstellt.
In den meisten praktischen Korrosionsfällen geht die flächige Korrosion nach einer gewissen Dickenabnahme in eine flächenmuldige Korrosion über [52].
Bei Stahl in neutralen Medien stellt sich gleichmäßige Flächenkorrosion ein, wenn durch die Strömungsgeschwindigkeit eine Deckschichtbildung unterdrückt wird, die zu muldenförmigem Abtrag führen könnte.
Normalerweise liegt *makroskopisch* eine gleichmäßige Deckschicht aus Korrosionsprodukten vor, nach deren Entfernung eine eben erscheinende, aufgeraute Oberfläche auftritt. Anders als bei der selektiven oder der interkristallinen Korrosion muss der Korrosionsangriff und der Materialabtrag *lichtmikroskopisch* gefügeunabhängig sein. Die Korrosionsprodukte müssen bei der *analytischen* Untersuchung an verschiedenen Testpositionen die gleiche Zusammensetzung haben, da eine unterschiedliche Zusammensetzung auf eine lokale Störung im Korrosionssystem schließen lässt und somit keine gleichmäßige Flächenkorrosion hervorrufen kann [nach 72].

3.2.2. Muldenkorrosion

Die Muldenkorrosion gehört zu den Korrosionsarten mit ungleichmäßigem Flächenabtrag. Ursachen dafür sind:

- unterschiedliche Werkstoffe
- Werkstoffinhomogenitäten
- ungleichmäßige Deckschichten
- unterschiedliche Elektrolyte

Hauptkennzeichen ist eine raue, mulden- oder narbenförmige [74] Oberfläche mit zusammenhängenden Mulden, auf der es zu einer örtlichen Anhäufung von Korrosionsprodukten kommen kann [59]. Eine eindeutige Abgrenzung zur Lochkorrosion ist häufig schon *makroskopisch* erkennbar, da die angegriffenen Stellen eine größere Breiten- als Tiefenausdehnung haben. Unter dem *Lichtmikroskop* kann zusätzlich die vergleichsweise glatte Oberfläche der Mulden festgestellt werden [59].

3.2.3. Kontaktkorrosion

Die Kontaktkorrosion kommt an der Berührungsstelle zweier Materialien vor. Entweder an einer Metall/Metall-Paarung oder bei einem Metall in Verbindung mit einem elektronenleitenden Festkörper [56].

Normalerweise liegen zwei Metalle mit einem Potentialunterschied von mehr als 50 mV vor, die über einen stromleitenden Elektrolyten miteinander verbunden sind. Dabei kommt es zu einer deutlichen Auflösung des unedleren Werkstoffes, der damit zur Anode wird, während das edlere Metall als Kathode unangegriffen bleibt [56]. Bei der Paarung Cu/nichtrostender Stahl handelt es sich beispielsweise um eine ungefährliche Zusammensetzung, da beide ein annähernd gleiches Potential aufweisen [75].
Das Phänomen der Kontaktkorrosion nutzt man beim Einsatz von unedleren Überzügen, wie zum Beispiel Zinküberzügen, aus. Bei solchen Werkstoffpaarungen wird das zu schützende Material auch dann noch geschützt, wenn der Überzug verletzt ist, da sich an solchen Stellen eine Kontaktkorrosion einstellt, die zum Abtrag des unedleren Überzugs führt. Bei Zink besteht jedoch beim Einsatz in Temperaturbereichen über 60-70 °C die Gefahr einer Potentialveredelung, womit Zink edler als Stahl wird und somit den Grundwerkstoff sehr stark angreift [56, 76].
Ein Überzug mit einem edleren Metall wie zum Beispiel Gold ist dagegen nur sinnvoll, wenn er unverletzt und porenfrei ist, da es bei einer Verletzung automatisch zum Angriff des unedleren Grundmaterials kommen würde.
Zur Vermeidung von Kontaktkorrosion sollte beim Einsatz in strömenden Medien darauf geachtet werden, dass der unedlere Werkstoff in Strömungsrichtung vor dem edleren angeordnet wird, da sich ansonsten durch die Ablagerung von abgetragenen Teilchen ein Kontaktelement bilden kann, das zu einem Angriff des Bauteils an der unedleren Komponente führen könnte. Bei richtiger Anordnung werden die unedleren Teilchen am edleren Werkstoff oxidiert, so dass kein Korrosionsschaden entstehen kann [76]. Dieser Vorgang wird als Zementation bezeichnet [53].
Entscheidend für die Abtragungsrate ist neben der Höhe der Potentialdifferenz das Flächenverhältnis von Anode zu Kathode. Je kleiner die Anode im Verhältnis zur Kathode ist, desto höher ist die auftretende Stromdichte am unedleren Werkstoff, weswegen er sehr schnell abgetragen wird. Es empfiehlt sich also nicht, zwei große Kupferbleche mit einem Niet aus Stahl zu verbinden. Es ist darauf zu achten, dass die kleine Fläche aus einem edleren Material besteht, weswegen man beispielsweise auch Schweißzusatzwerkstoffe etwas edler als den Grundwerkstoff wählen sollte [76].
Zur Abschätzung, ob Kontaktkorrosion auftreten kann oder nicht, kann die praktische Spannungsreihe herangezogen werden (vgl. Tab. 1).

Praktische Spannungsreihe für Wasser pH-Wert 6,0		Elektrochemische Spannungsreihe der Element		Praktische Spannungsreihe für Meerwasser pH-Wert 7,5	
Metall	mV	Metall	mV	Metall	mV
Silber	+195	Silber	+799	Silber	+149
Kupfer	+140	Kupfer	+345	Nickel	+46
Nickel	+118	Blei	-130	Kupfer	+10
Aluminium	(-169)	Zinn	-140	Blei	-259
Zinn	(-175)	Nickel	-230	Zink (Zn 98,5)	-284
Blei	(-283)	Cadmium	-400	Stahl	-335
Stahl	-350	Eisen	-440	Cadmium	-519
Cadmium	-574	Zink (Zn 98,5)	-760	Aluminium	-667
Zink (Zn 98,5)	-823	Aluminium	-1660	Zinn	-809

Tabelle 1: Spannungsreihen (bezogen auf Normalwasserstoffelektrode) [77]

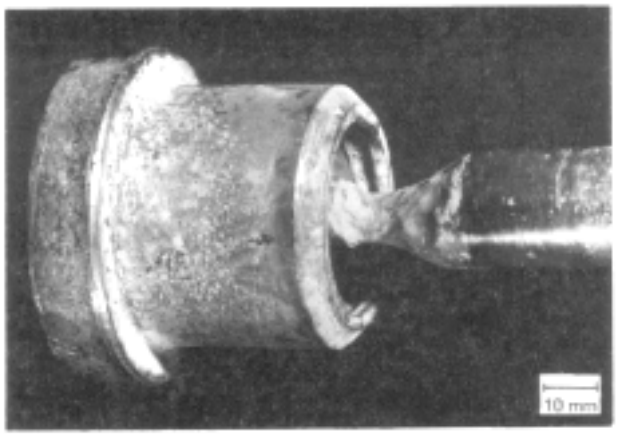


Abbildung 13: Kontaktkorrosion [59]

Makroskopisch ist ein flächenmäßig begrenzter Abtrag des unedleren Metalls an der Kontaktstelle feststellbar (vgl. Abb. 13), wobei Korrosionsprodukte nur vereinzelt und in strömenden Medien meist nicht auftreten. Es findet ein örtlicher Abtrag des unedleren Metalls bis zum Durchbruch statt [59].
Lichtmikroskopisch ist eine deutliche Auflösung des unedleren Metalls häufig in Muldenform erkennbar. Es handelt sich dabei um flache Oberflächenvertiefungen [78].
Eine *elektronenmikroskopische* Untersuchung ist nicht notwendig, während bei der *analytischen* Untersuchung sowohl die chemische Zusammensetzung der beiden Metalle als auch die Zusammensetzung und daraus folgend die Leitfähigkeit der Elektrolytlösung ermittelt werden kann.

3.2.4. Lochkorrosion

Lochkorrosion tritt bevorzugt bei passivierenden Metallen auf, bei denen die Passivschicht örtlich zerstört wird. Die auftretenden Lochfraßstellen bilden Anoden, die von der passiven Werkstoffoberfläche umgeben sind, die die Kathode darstellt. Aufgrund des großen Kathoden/Anodenverhältnisses tritt eine sehr hohe Stromdichte auf (vgl. Kap. 3.2.3.), die zu einem schnellen Materialabtrag in Form einer nadelstichartigen Anfressung bis hin zur Lochkorrosion führt.

Die Zerstörung der Passivschicht ist meist auf die Anwesenheit von Halogeniden zurückzuführen, wobei der Mechanismus, der zur Lochkeimbildung führt, noch umstritten ist. Es werden der Penetrations-, der Adsorption- und der Schichtrissmechanismus diskutiert [79, 80, 81]. Chloride haben als Auslöser eine besondere Bedeutung, während der Einfluss von Bromiden geringer und von Jodiden sehr gering ist. Fluoride sind nie an der Schadeninitiierung beteiligt [5, 56, 71]. Bei korrosionsbeständigen Stählen kann durch eine Erhöhung des Legierungselementes Molybdän auf mindestens 2,3 % eine Lochfraßbildung unter Chlorideinfluss verringert werden [58, 82], während diese Maßnahme bei Brom nicht so wirkungsvoll ist [1]. Ob ein Angriff stattfindet, hängt außerdem von der Strömungsgeschwindigkeit des Mediums ab. Je niedriger sie ist, desto negativer ist die Auswirkung, da aufgrund des geringeren Sauerstofftransportes die Passivschicht nicht ausreichend mit Sauerstoff versorgt wird, und zusätzlich den Chloriden eine verlängerte Einwirkungszeit gewährt wird, um die Oxidschicht zu zerstören. Als Grenzwert, der bei nicht molybdänlegiertem CrNi-Stahl nicht unterschritten werden soll, gilt 0,5 m/s [55, 71]. Bei mehr als 2,5 m/s ist nicht mehr mit Lochkorrosion zu rechnen [55, 71].
Besonders gefährlich sind örtliche Chloridaufkonzentrationen, wie sie beispielsweise durch Salzkrustenbildung an Wärmeaustauscherrohren, durch unvollständige wasserseitige Füllung oder Anreicherung in Spalten bewirkt werden [83].
Weitere Gefügebereiche, die ein unedleres Potential haben und somit bevorzugt zur Anode werden können, sind Anlaufschichten, die zum Beispiel in der Nähe von Schweißnähten auftreten können [52, 75].

Makroskopisch fällt die stark lokal begrenzte Angriffsfläche (vgl. Abb. 14) mit nur geringer Flächenausdehnung auf der Oberfläche auf. Der Flächenabtrag findet somit nur in der Korrosionsstelle statt, während die sonstigen Werkstoffbereiche praktisch nicht angegriffen werden. Im fortgeschrittenen Zustand haben die angegriffenen Stellen eine gleiche oder größere Tiefe als der Durchmesser, wobei der Durchmesser 1-2 mm (vgl. Abb. 15) erreichen kann [6]. Der Gewichtsverlust der angegriffenen Stellen ist im Vergleich zum Gesamtgewicht minimal.

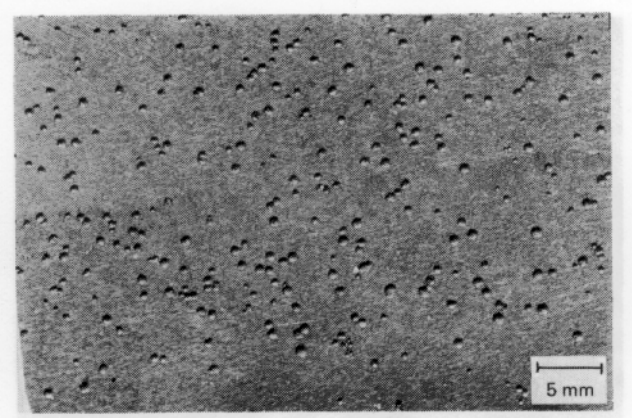


Abbildung 14: stark lokal begrenzte Angriffsfläche [59]

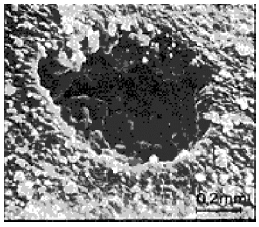


Abbildung 15: Loch mit Durchmesser 1-2 mm [Lan92]

Lichtmikroskopisch sind die typischen, häufig halbkugelförmigen, die Oberfläche unterhöhlenden [83] oder manchmal auch nadelstichartigen oder kraterförmigen Angriffsbereiche gut erkennbar [84] (vgl. Abb. 16).

Abbildung 16: Ausbildungsformen der Lochkorrosion [82, 83]

Bei *elektronenmikroskopischen* (REM) Untersuchungen ist die scharfe örtliche Begrenztheit des Angriffs ersichtlich. Außerdem können Ätzgrübchen vorhanden sein [59].
Bei der Lochkorrosion sind fast immer Halogenide beteiligt, weswegen bei der *analytischen* Untersuchung sowohl des vorliegenden Mediums als auch der Korrosionsprodukte meist Chloride oder Bromide nachgewiesen werden können. In den Löchern ist oft eine Ansammlung von Salzen feststellbar. In normaler Atmosphäre handelt es sich dabei um Eisen(II)-chlorid, während in Industrieatmosphäre Eisen(II)-sulfat vorliegt [56, 87].

Die Lochkorrosion tritt sehr häufig an passiven bzw. passivierbaren Werkstoffen wie zum Beispiel nichtrostenden Stählen, Kupfer, Aluminium, Titan, Nickel und ihren Legierungen auf.

Für austenitische CrNi-Stähle findet sich folgende Tabelle der Lochfraß begünstigenden Einflussgrößen:

Lochfraßkorrosion	
begünstigend	vermeidend
Werkstoff	
Geringe Gehalte an Chrom, Molybdän	Hohe Gehalte an Chrom, Molybdän
Inhomogenes Gefüge, Oxid- und Sulfideinschlüsse	Homogenes Gefüge
Oberflächengüte	
Rau	Poliert
Kaltverformung	
Hoch	Gering
Angriffsmittel	
Hohe Chlorionenkonz.	Niedrige Konzentration
Hohe Temperatur	Niedrige Temperatur
Niedriger pH-Wert	Hoher pH-Wert
Geringe Strömungsgeschwindigkeit	Hohe Strömungsgeschwindigkeit
Konstruktion	
Spalte	Vermeidung von Spalten

Tabelle 2: Einflussfaktoren der Lochkorrosion bei nichtrostenden Stählen [5]

3.2.5. Spaltkorrosion

Spaltkorrosion tritt an unzureichend belüfteten Spalten mit einem Verhältnis der Breite zur Tiefe von mind. 1:5 auf [56], wobei Spaltbreiten unter 1 mm besonders kritisch sind [86]. Dabei muss der zweite spaltbildende Werkstoff kein Metall wie zum Beispiel bei einer Rohrschelle sein, es kann sich dabei auch um Dichtungen oder Verpackungsmaterial handeln [1, 87]. Niet-, Klebe- oder ähnliche Nähte sind ebenfalls betroffen, wobei hier eine Aufweitung des Spaltes auftreten kann, da die Korrosionsprodukte ein größeres Volumen einnehmen, als es der Spalt ermöglicht [53]. Ein weiterer Gefahrenpunkt sind beispielsweise nicht durchgeschweißte Wurzeln von Schweißnähten [81].
Die Spaltkorrosion beruht auf dem Konzentrationsunterschied des korrosiven Mediums im Spalt und in der restlichen Lösung. Bei nichtrostenden Stählen ist zusätzlich die Anreicherung von Halogeniden im Spalt von großer Bedeutung, da wie bei der Lochkorrosion eine Ansäuerung im Spalt durch Hydrolyse auftreten kann [82]

Makroskopisch sind meist außerhalb des Spaltes nahe der Öffnung Korrosionsprodukte zu finden, wobei im Spalt verstärkt Korrosion feststellbar ist [59].

Lichtmikroskopisch ist im Querschliff eine deutliche Erweiterung des Spaltes zur Tiefe hin erkennbar [59] (vgl. Abb. 17).

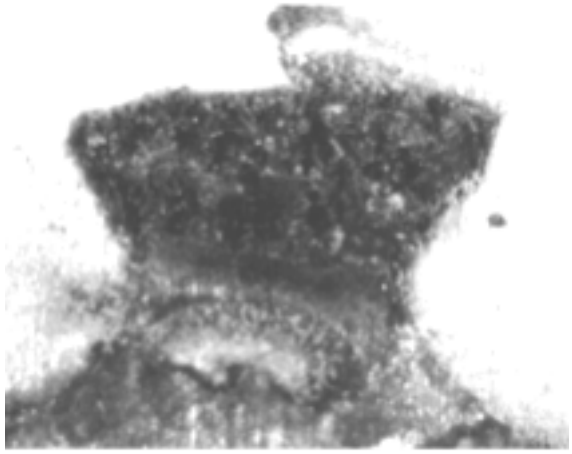


Abbildung 17: Spaltkorrosion

3.2.6. Berührungs- und Belüftungskorrosion

Sowohl die Berührungskorrosion, die auch als Ablagerungskorrosion bekannt ist, als auch die Belüftungskorrosion beruhen auf Konzentrationselementen.

Die Berührungskorrosion tritt unter Ablagerungen wie Schlämmen, Steinen oder Sand auf [59], die sich beispielsweise in Wasserrohren oder Behältern abgelagert haben. Die Belüftungskorrosion ist dagegen in Bereichen zu finden, in denen sich wässrige Ablagerungen oder Wassertropfen gebildet haben, wie es zum Beispiel bei einer falschen Dichtheitsprüfung bei Wasserrohrleitungen [58] oder beim Stillstand von dampfführenden Systemen vorkommt, was zur Dampfkondensation und daraus folgenden wässrigen Ablagerungen führt [88].

Makroskopisch sind mulden- bis lochförmige Auskolkungen feststellbar. Korrosionsprodukte sind je nach Oxidationszustand über oder neben dem Angriffsbereich auffindbar. Bei der Belüftungskorrosion enthalten sie jedoch keine Fremstoffablagerungen wie Sand oder ähnliches [59].

Lichtmikroskopisch sind bei der Belüftungskorrosion im Schliff kraterförmige, häufig scharf begrenzte Vertiefungen (vgl. Abb. 18) erkennbar, während bei der Berührungskorrosion mulden- bis lochförmige Vertiefungen vorliegen [59].

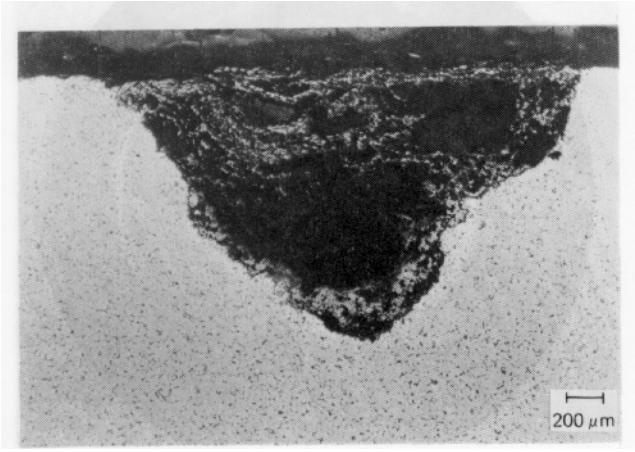


Abbildung 18: kraterförmige,scharf begrenzte Vertiefung [59]

Bei der *analytischen* Untersuchung können in den Korrosionsprodukten meist Chloride und die Zusammensetzung der Ablagerung festgestellt werden. Falls Fremdstoffe enthalten sind, handelt es sich um Berührungskorrosion, die durch eine entsprechende Ablagerung ausgelöst worden ist. Fehlende Fremdstoffe deuten auf Belüftungskorrosion hin [71].

3.2.7. Interkristalline Korrosion

Die interkristalline Korrosion tritt hauptsächlich an austenitischen CrNi-Stählen auf [89, 90]. Die Ursache dafür ist die Ausscheidung von Chromkarbiden oder Chromnitriden infolge einer Wärmebehandlung. Die anfälligen CrNi-Stähle und auch Nickel-Basis-Legierungen werden normalerweise im lösungsgeglühten Zustand verarbeitet. Sie werden nach dem Glühen bei 1050 bis 1150 °C in Wasser abgeschreckt, womit ein homogener Werkstoffzustand geschaffen wird, der an Kohlenstoff übersättigt ist. Ein sogenannter sensibilisierter Zustand stellt sich ein, wenn der Werkstoff auf Temperaturen zwischen 550 und 850 °C erwärmt [91, 92] oder langsam durch diesen Temperaturbereich abgekühlt wird [56], wie es beim Schweißen oder besonders beim Spannungsarmglühen vorkommt. Die zur Sensibilisierung führende Karbidausscheidung hängt zusätzlich von der Dauer der sensibilisierenden Wärmebehandlung und von der Höhe des Kohlenstoffgehaltes im Stahl ab (vgl. Abb. 19) [90].

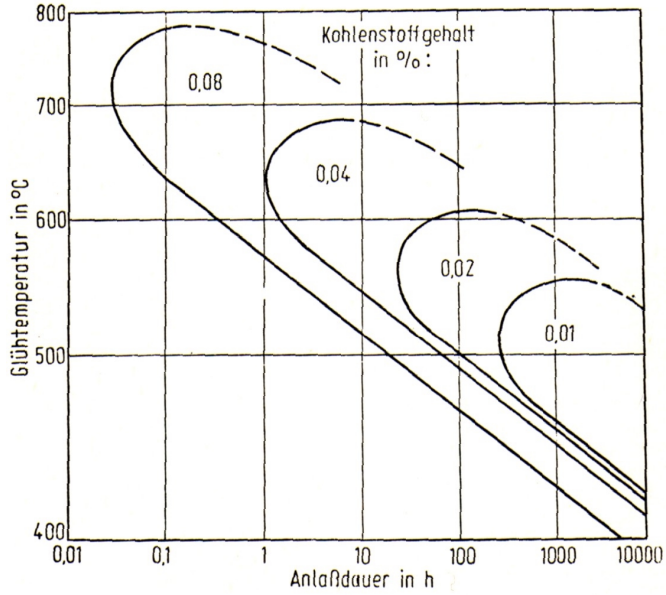


Abbildung 19: Kornzerfallsschaubilder unstabilisierter austenitischer Stähle mit rund 18 % Cr und 8 % Ni [93]

Ein derartig beanspruchtes Material hat eine geringere Löslichkeit für Kohlen- und Stickstoff, weswegen Ausscheidungen in Form von chromreichen Carbiden $Cr_{23}C_6$ und Nitriden Cr_2N bevorzugt an den energetisch günstigeren Korngrenzen auftreten, was zu einem Chromentzug in den Bereichen in der Nähe der Korngrenzen führt [94]. Diese Bereiche werden aufgrund des Chrommangels unedler und damit korrosionsanfälliger als die chromreichen Korngrenzen, weswegen die Korrosion auf den unmittelbaren Korngrenzenbereich beschränkt ist.

Bei austenitischen Stählen tritt die interkristalline Korrosion in Form des Schweißnahtzerfalls auf, bei dem ein ausgeprägter Angriff auf beiden Seiten der Schweißnaht vorliegt. Man kann also unterscheiden, ob ein Auftreten der Kennzeichen im gesamten Angriffsbereich, was einen generell ungeeigneten Gefügezustand anzeigt, oder in Zonen mit thermischer Beeinflussung (Schweißnahtnähe) vorliegt [95].
Ein auffallendes Merkmal ist, dass das geschädigte Bauteil den kennzeichnenden, metallischen Klang verändert [59].
Medien, die diese Angriffsart fördern, sind vor allem saure Lösungen und neutrale Chloridlösungen, wie zum Beispiel Meerwasser [56].
Folgende Gegenmaßnahmen können gegen die interkristalline Korrosion ergriffen werden:

- Auflösung der Chromkarbide oberhalb der Sensibilitätsgrenze mit anschließendem raschen Abkühlen, wobei diese Maßnahme nur bei kleinen Bauteilen möglich ist [56]
- Erniedrigung des Kohlenstoffgehalts auf weniger als 0,03 % [93]
- Zusatz von karbidbildenden Legierungselementen als Stabilisatoren wie zum Beispiel Titan, Niob, Tantal oder Vanadium [93]

Makroskopisch ist die Oberfläche durch ein Riss- und Grabenfeld gekennzeichnet [6, 59]. Sie erscheint rau, wobei teilweise einzelne Körner sandartig herausgelöst sind [59, 92]. Korrosionsprodukte sind keine erkennbar, weswegen es sich um einen sehr heimtückischen Angriff handelt [57, 59]. Die Trennfläche ist metallisch glänzend bis matt, grobkörnig bis sandartig rau und verformungslos [59].
Lichtmikroskopisch ist der Angriff unmittelbar auf die Korngrenzen beschränkt. Bei fortgeschrittener Korrosion sind Bereiche herausgelöster Kristallite erkennbar (vgl. Abb. 20, 21) [93, 96, 97].

Abbildung 20: herausgelöste Kristallite [97]

Elektronenmikroskopisch sind im fortgeschrittenen Zustand freiliegende Korngrenzflächen feststellbar [96]. Im geätzten Schliff können manchmal regellos verteilte Chromkarbide gefunden werden (vgl. Abb. 22) [82].

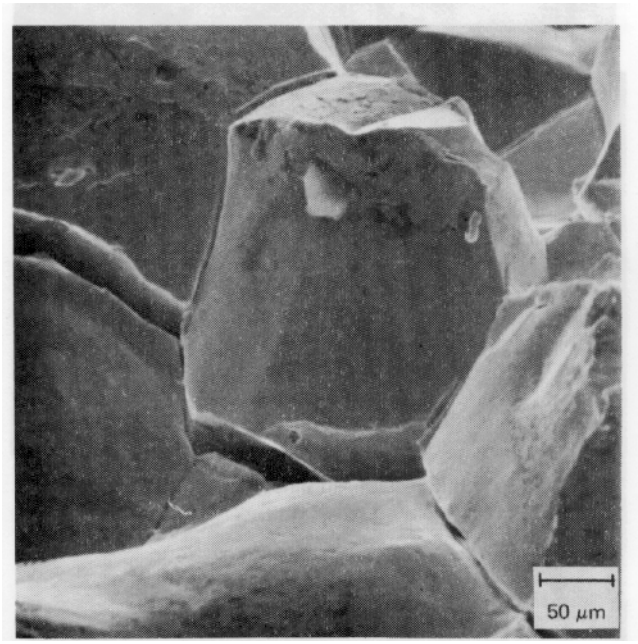


Abbildung 21: freiliegende Korngrenzflächen [96]

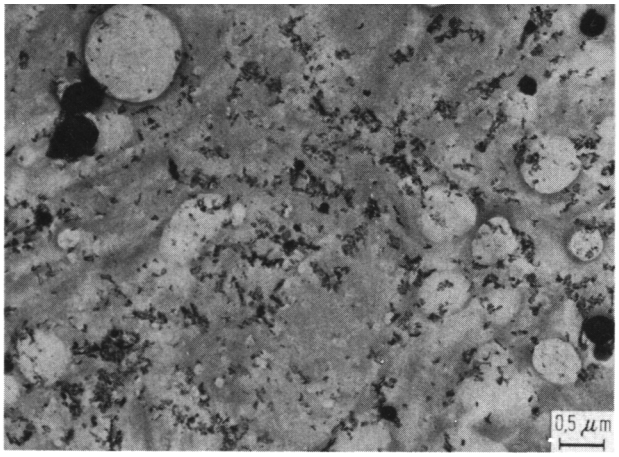


Abbildung 22: regellos verteilte Chromcarbidausscheidungen in nichtrostendem Stahl [82]

3.2.8 Erosionskorrosion

Die Erosionskorrosion ist laut DIN 50900 als Zusammenwirken von mechanischer Oberflächenabtragung (Erosion) und Korrosion definiert, wobei die Korrosion durch Zerstörung von Schutzschichten als Folge der Erosion ausgelöst wird [98].

Sie tritt in durchströmten Systemen sowohl bei laminarer als auch turbulenter Strömung auf. Bei laminarer Strömung beruht sie auf zu hoher Strömungsgeschwindigkeit, die zu einem ungleichmäßigen Flächenabtrag führt. Bei un-/niedriglegiertem Stahl liegt der Grenzwert beispielsweise bei 4 m/s [58] (vgl. Abb. 23).

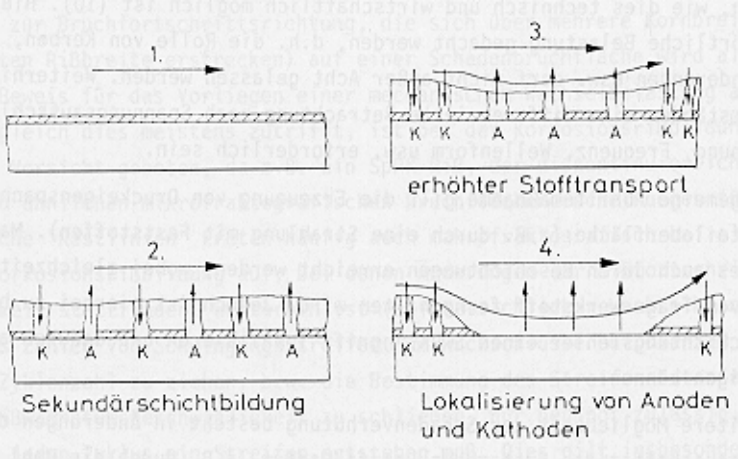


Abbildung 23: Entstehung der Erosionskorrosion [6]

Erosionskorrosion aufgrund turbulenter Strömung tritt in Bereichen auf, in denen Strömungsstörungen vorliegen wie zum Beispiel Querschnittsverengungen oder scharfe Umlenkungen [58].
Makroskopisch können lokale Zerstörungen der Schutzschicht festgestellt werden, die unterschiedliche Erscheinungsformen zeigen. Entweder haben sie glatte, wellenförmige Oberflächenkonturen oder vereinzelte, unabhängige hufeisenförmige Vertiefungen. Weiterhin können kometenschweifförmige Schlieren auftreten, die in Strömungsrichtung ausgerichtet sind, oder Furchen in Strömungsrichtung oder sanddünenähnliche Konturen [99] (vgl. Abb. 24, 25). Normalerweise können bei der Erosionskorrosion keine Korrosionsprodukte gefunden werden, wenn es sich nicht um intermittierenden Betrieb der Leitung handelt [99]. Falls dennoch Korrosionsprodukte zu finden sind, handelt es sich immer um ein Oxidationsprodukt des abgetragenen Metalls und nie um ein Metall selbst [6].

Abbildung 24: kometenschweifförmige Schlieren bei Erosionskorrosion (Vergrößerung: 8x)

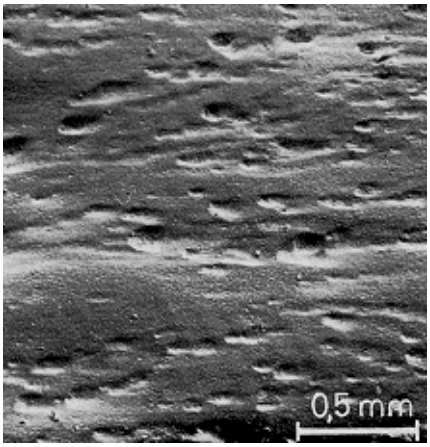


Abbildung 25: Strömungsbeeinflusste Korrosion im Ringspalt der Umlenkbleche eines ND-Vorwärmers [6]

Bei nichtrostenden Stählen wurde der Strömungseinfluss aufgrund der Expertengespräche und der Simulationsversuche als irrelevant eingestuft, da die Passivschicht eine sehr harte Schicht darstellt, die durch den erhöhten Sauerstofftransport, der bei hoher Strömungsgeschwindigkeit stattfindet, noch dichter wird und deswegen Korrosion verhindert. Bei diesen Stählen ist eine zu langsame Strömungsgeschwindigkeit eher von negativer Bedeutung, da aufgrund des geringeren Sauerstofftransportes die Passivschicht nicht ausreichend mit Sauerstoff versorgt wird, und zusätzlich den Chloriden eine verlängerte Einwirkungszeit gewährt wird, um die Oxidschicht zu zerstören. Als Grenzwert, der bei nicht molybdänlegiertem CrNi-Stahl nicht unterschritten werden sollte, wurde 0,5 m/s genommen [54, 71, 72].

3.2.9. Flüssigkeitsaufprallerosion (Tropfenschlag)

Diese Korrosionsart wird auch als Tropfenschlag bezeichnet. Dabei tritt durch den Aufprall von Flüssigkeitstropfen aus einer Gasströmung oder eines Flüssigkeitsfreistrahles ein Materialabtrag von festen Oberflächen auf [100]. Der dabei entstehende große Flächendruck verursacht an der Auftrefffläche je nach Duktilität des Materials entweder plastische Verformungen mit Kraterbildung oder direkt kreisförmige Risse im Material wegen einer Überschreitung der Druckfestigkeit. Diese Erscheinungen werden durch nachfolgende Flüssigkeitstropfen vertieft bzw. erweitert. Durch eine Vereinigung mehrerer derartiger Risse zu Ausbrüchen erfolgt der eigentliche Materialabtrag. Je größer die kinetische Energie, die zum Beispiel von der Tropfengröße oder der Relativgeschwindigkeit abhängt, und je geringer das plastische Verformungsverhalten des Materials unter Druck und Druckschwellbeanspruchung ist, desto größer ist die Schädigung [6].

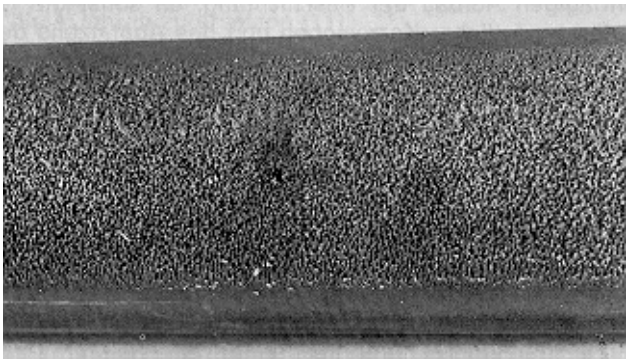


Abbildung 26: raue, zerklüftete Oberfläche an korrosionsbeständigem Werkstoff durch scharf auftreffenden Nassdampf [100]

Makroskopisch ist bei unlegierten und niedriglegierten Stählen kein Unterschied zur strömungsbeeinflussten Korrosion vorhanden. Es zeigen sich glatte, metallisch glänzende Abtragungszonen, da hier eine auflösende Korrosion zur Einebnung der Oberfläche führt [6].
Weitgehend korrosionsbeständige Werkstoffe weisen dagegen eine raue, zerklüftete Oberfläche auf, die durch den Ausbruch von Materialpartikeln entsteht [100] (vgl. Abb. 26).
Elektronenmikroskopisch zeigt sich jedoch bei hoher Vergrößerung an un-/niedriglegierten Stählen ein charakteristischer Unterschied zur strömungsbeeinflussten Korrosion, da in der völlig glatten Oberfläche die Perlitinseln ausgebrochen sind, weil sie Hindernisse für die Radialströmung darstellen [6].
Bei der *analytischen* Untersuchung kann als wichtigstes Unterscheidungsmerkmal zur strömungsbeeinflussten Korrosion festgestellt werden, dass das Abtragprodukt mit dem Oberflächenmaterial faktisch identisch ist.

3.2.10. Kavitationskorrosion

Bei der Kavitation erfolgt der mechanische Angriff durch implodierende Gasblasen, die sich im schnell strömenden Medium nach plötzlichen Druckerniedrigungen bilden [101]. Dementsprechend tritt die Kavitationskorrosion nur an spezifischen Schadstellen auf, an denen starke Druckänderungen vorliegen, wie das bei Turbinenschaufeln, Propellern oder Düsen der Fall ist.
Makroskopisch ist ein scharfer, rauer, schwammähnlicher Materialverlust festzustellen, wobei die betroffenen Stellen frei von Ablagerungen oder Korrosionsprodukten sind, solange die Korrosion aktiv ist. Das heißt, dass kein Stillstand der Kavitation eintreten darf, nachdem die Deckschicht zerstört wurde [99].

3.2.11. Feststoffaufprallerosion

Die Feststoffaufprallerosion kann auch als Sonderfall der Reibkorrosion angesehen werden und wird gelegentlich auch als Strahl-, Abrasions- oder Erosionverschleiß bezeichnet. Es handelt sich dabei um eine gleichzeitige chemische und mechanische Einwirkung einer schnellströmenden, feststoffhaltigen Flüssigkeit auf eine Metalloberfläche.
Ein besonders wichtiger Parameter ist der Aufprallwinkel, mit dem die Feststoffteilchen auftreffen. So werden harte Werkstoffe durch große Winkel besonders geschädigt, während wei-

che Materialien meist bei kleineren Winkeln einen höheren Abtrag aufweisen. Eine weitere Einflussgröße ist die kinetische Energie der Partikel, also ihre Größe und Geschwindigkeit.
Obwohl die Feststoffaufprallerosion eine große praktische Bedeutung hat, sind die Eigenschaften und Gesetzmäßigkeiten bisher nur wenig erforscht. [6]

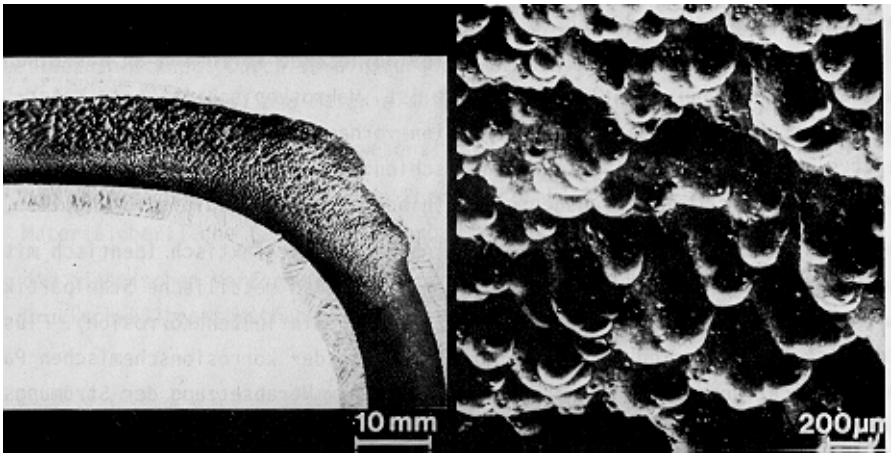


Abbildung 27: Erosiver Abtrag durch Feststoff (Eisenoxide) im Rohrkrümmer eines HD-Vorwärmers [6]

Das *makroskopische* Erscheinungsbild ähnelt dem der Kavitationskorrosion [6] (vgl. Abb. 27).
Bei der *analytischen* Untersuchung ist im Gegensatz zur Flüssigkeitsaufprallerosion die Feststellung von Fremdmaterial in der beschädigten Werkstoffoberfläche ein unterscheidendes Merkmal [6].

3.2.12. Schwingungsrisskorrosion (Korrosionsermüdung)
Unter Schwingungsrisskorrosion versteht man Rissschäden, die an einem Bauteil bei mechanischer Wechselbeanspruchung und gleichzeitiger Einwirkung eines Angriffsmittels entstehen [92]. Im Gegensatz zur Spannungsrisskorrosion müssen hier keine besonderen Bedingungen wie eine spezifische Empfindlichkeit des Werkstoffes oder besondere Eigenschaften des Elektrolyten vorliegen [5, 82, 93] (vgl. Kap. 3.2.13). Deswegen kann die Schwingungsrisskorrosion bei allen metallischen Werkstoffen auch in Gegenwart unspezifischer Angriffsmittel vorkommen.
Ihre Entstehung verläuft in drei Stadien [5]:
Im Vorstadium bilden sich aufgrund der dynamischen Beanspruchung Gleitlinien, die eine Wechselwirkung mit dem Elektrolyten ermöglichen. In diesen Bereichen lokalisiert sich die Korrosion unter Bildung von Mikrorissen, die sowohl aufgrund der korrosiven als auch der mechanischen Einwirkungen immer weiter in den Werkstoff eindringen können, bis im letzten Stadium ein Bruch eintritt [156].
Es gibt mehrere Maßnahmen, die zur Verhinderung der Schwingungsrisskorrosion beitragen, die alle auf demselben Prinzip beruhen, dass sie Gleitvorgänge an der Oberfläche ver- oder behindern. Eine Maßnahme ist die Wahl eines Werkstoffes mit einer hohen Dauerschwingfestigkeit, eine andere besteht aus der Kaltverformung der Oberfläche, wodurch Druckeigenspannungen in der Bauteiloberfläche erzeugt werden, die zu einer Verfestigung der Randzo-

nen führen. Dies kann durch eine Strahlung mit Feststoffen geschehen. Oberflächenbeschichtungen wie Diffusionsschichten und Oberflächenhärtung erschweren ebenfalls die Gleitvorgänge, während nichtmetallische Überzüge ebenfalls eine Korrosionshemmung bewirken, wenn sie den Zutritt des Mediums zuverlässig verhindern [5, 6].

Schwingungsrisskorrosion ist sowohl an Stählen im aktiven als auch im passiven Zustand möglich.

Makroskopisch ist bei beiden Arten eine verformungsarme, ebene, samtartige, rau bis grobkörnige und matte Risstrennfläche feststellbar [59]. Der Rissverlauf liegt fast immer nahezu senkrecht zur Hauptnormalspannung [59].
Falls bei der *analytischen* Untersuchung Korrosionsprodukte im Riss nachgewiesen werden können, ist dies ein sicherer Hinweis auf das Vorliegen von Schwingungsrisskorrosion [59, 92, 93].

3.2.12.1. Schwingungsrisskorrosion an aktiven Werkstoffoberflächen
Makroskopisch ist ein korrosiver Oberflächenangriff, meist in Form von Grübchen, feststellbar, von denen aus Risse in den Werkstoff hineinwachsen. Somit beobachtet man eine narbige Oberfläche, bei der häufig zahlreiche parallel zueinander, geradlinig verlaufende Risse ohne Rissverzweigung auftreten [6, 102] (vgl. Abb. 28).

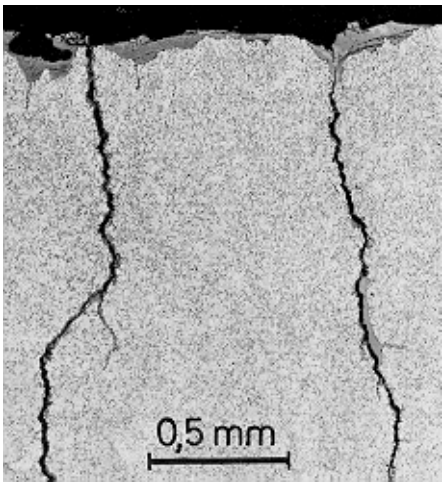


Abbildung 28: parallele Risse aufgrund Schwingungsrisskorrosion [6]

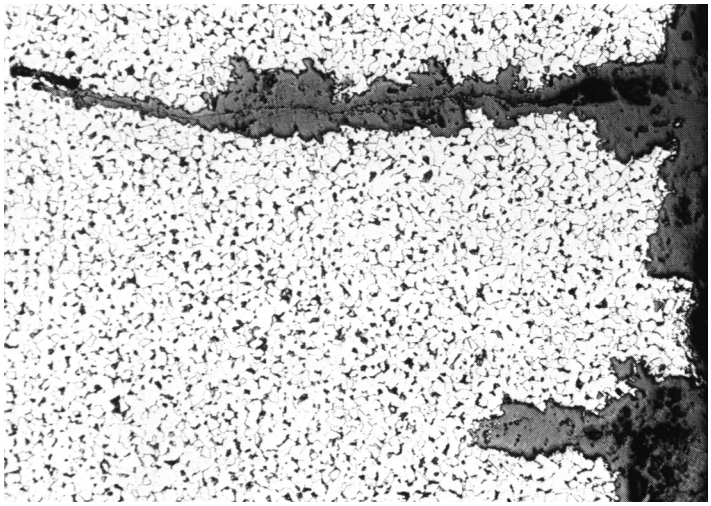


Abbildung 29: starke Zerklüftung der Risse [97]

Lichtmikroskopisch ist ein fast ausschließlich [6] transkristalliner Rissverlauf senkrecht zur Oberfläche feststellbar, der nur wenig verästelt oder verzweigt ist (vgl. Abb. 28). Die Risse gehen häufig von Grübchen aus, wobei im Schliffbild sowohl in den Grübchen als auch an den Rissflanken häufig Korrosionsprodukte zu erkennen sind, während die Oberfläche korrosionsproduktfrei ist [99]. Bei der fraktographischen Untersuchung fällt auf, dass die Bruchflächen stark zerklüftet sind [97, 103], wobei diese Eigenart insbesondere bei niederzyklischer Schwingungsrisskorrosion vorliegt [6] (vgl. Abb. 29).

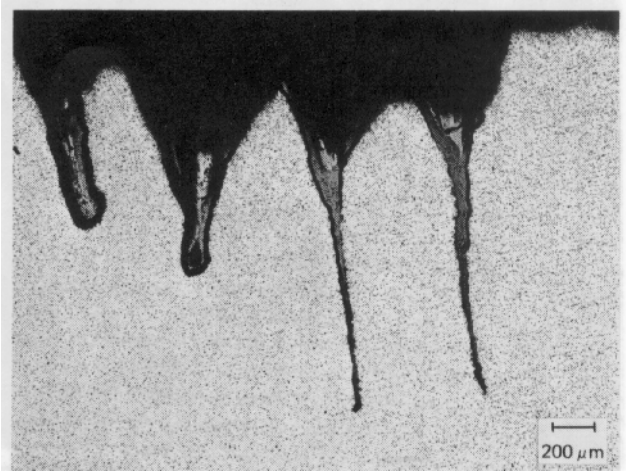


Abbildung 30: Ätzgrübchen als Rissausgangspunkte [59]

Elektronenmikroskopisch sind transkristalline und gelegentlich auch interkristalline Bruchmerkmale zu beobachten. Obwohl der Rissausgangspunkt an der Werkstoffoberfläche und die Rissfortschrittsrichtung meistens zu erkennen sind (vgl. Abb. 30), fehlen oft die für Wechselbeanspruchung charakteristischen Schwingungsstreifen im mikrofraktographischen Bruchbild [6].

3.2.12.2. Schwingungsrisskorrosion an passiven Werkstoffoberflächen

Makroskopisch ist ein Korrosionsangriff weder an der Metalloberfläche noch im Riss erkennbar, da nur vernachlässigbare gleichmäßige Flächenkorrosion vorliegt, die zu einer glatten Oberfläche führt, von der meist nur ein Riss oder manchmal wenige Risse ausgehen [59, 93]. Im Gegensatz zum Aktivzustand sind keine Korrosionsprodukte feststellbar [55, 59, 71, 104]. Die Risse verlaufen bei der *lichtmikroskopischen* Betrachtung sehr geradlinig und unverzweigt (vgl. Abb. 31) [59, 102].

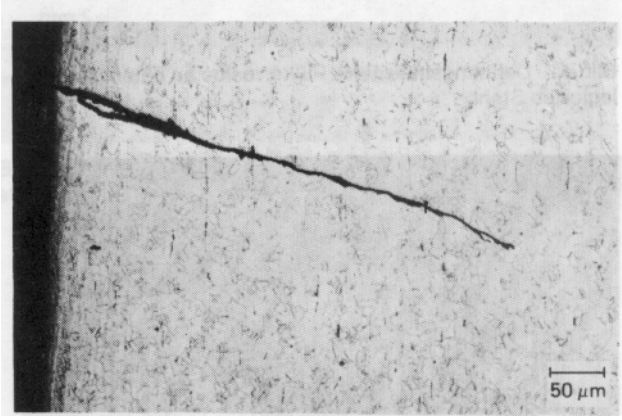


Abbildung 31: geradliniger und unverzweigter Rissverlauf [59]

Elektronenmikroskopisch ist mit überwiegend glatten Bruchflächen zu rechnen, die manchmal auch Schwingungsstreifen aufweisen. Es sind transkristalline, gelegentlich auch interkristalline Bruchmerkmale feststellbar [56, 59].

3.2.13. Spannungsrisskorrosion

Die Voraussetzungen für das Auftreten von Spannungsrisskorrosion in metallischen Werkstoffen sind

- von außen aufgebrachte oder innere Zugspannungen
- ein spezifisch einwirkendes Angriffsmittel
- Anfälligkeit des Werkstoffes für Spannungsrisskorrosion

Im Gegensatz zur Schwingungsrisskorrosion, die bei allen Werkstoff/Mediumspaarungen auftreten kann, müssen bei der Spannungsrisskorrosion alle drei Voraussetzungen vorliegen [5, 82, 92, 93, 105, 106, 107].

Bei manchen Systemen kommt jedoch noch ein vierter Faktor hinzu, nämlich die Temperatur, die aber anscheinend als Eigenschaft des Mediums angesehen und deswegen meist nicht gesondert aufgeführt wird.

Beispielsweise ist bei nichtrostendem Stahl Chloridlösung mit einem Chloridgehalt von mindestens 200 mg/l, der jedoch auch durch Anreicherungen unter Inkrusten oder anderen Ablagerungen erreicht werden kann, ein spannungsrisskorrosionsauslösendes Medium, das jedoch erst ab Temperaturen über 60°C gefährlich wird [6, 56]. Bei korrosionsbeständigen Stählen

kann das Spannungsrisskorrosionsverhalten durch Zugabe von Molybdän und insbesondere durch die Erhöhung des Nickelgehaltes positiv beeinflusst werden, wobei der Molybdängehalt mehr als 2,3% betragen muss, um eine positive Wirkung zu zeigen. Spannungsrisskorrosionsrisse an nichtrostenden Stählen sind meist transkristallin [108], während bei un-/niedriglegierten Stählen interkristalline Risse überwiegen. Bei diesen Stählen tritt Spannungsrisskorrosion bevorzugt in nitrathaltigen Lösungen und starken Laugen auf [92].
Bei den statischen Spannungen kann es sich um Eigenspannungen wie beispielsweise durch falsche Glühbehandlung, Kaltverformung, Schweißnähte, Einwalzungen, Kerben oder Schleifriefen handeln. Außerdem können äußere Spannungen vorliegen, die durch thermische oder mechanische Belastungen hervorgerufen werden [59].
Makroskopisch liegen häufig mehrere, sehr feine Risse vor, die ungefähr senkrecht zur Hauptspannung im Bauteil verlaufen. Dabei weisen die schadhaften Stellen manchmal kaum einen Korrosionsangriff auf, während in anderen Fällen eine eindeutige Oberflächenschädigung, die besonders durch Lochkorrosion hervorgerufen wird, auftritt [93]. Die Risse gehen somit entweder von Bereichen aus, die bereits von anderen Korrosionsarten (Lochkorrosion, IK etc.) geschädigt sind, oder von Kerben (Ex- oder Intrusionen) oder Einschlüssen [109]. Im Bereich von Schweißnähten kann ein bevorzugter Angriff vorliegen, was entweder auf die Eigenspannungen in diesem Gebiet oder auf Werkstoffveränderungen wie die Zusammensetzung des Schweißgutes oder die Gefügeausbildung in der Wärmeeinflusszone zurückzuführen ist. Die sprödbruchartige Bruchfläche ist verformungsarm, samtartig glatt, rau bis grobkörnig und matt [59, 78]. Korrosionsprodukte liegen nicht vor [55, 59, 71].
Lichtmikroskopisch liegen überwiegend entweder inter- oder transkristalline Rissverläufe vor, wobei auch Mischformen möglich sind. Die Risse besitzen eine ausgeprägte Verästelung oder Verzweigung der wenig klaffenden Haupt- und Nebenrisse (vgl. Abb. 32), obwohl in seltenen Fällen auch ein geradliniger Verlauf auftreten kann.

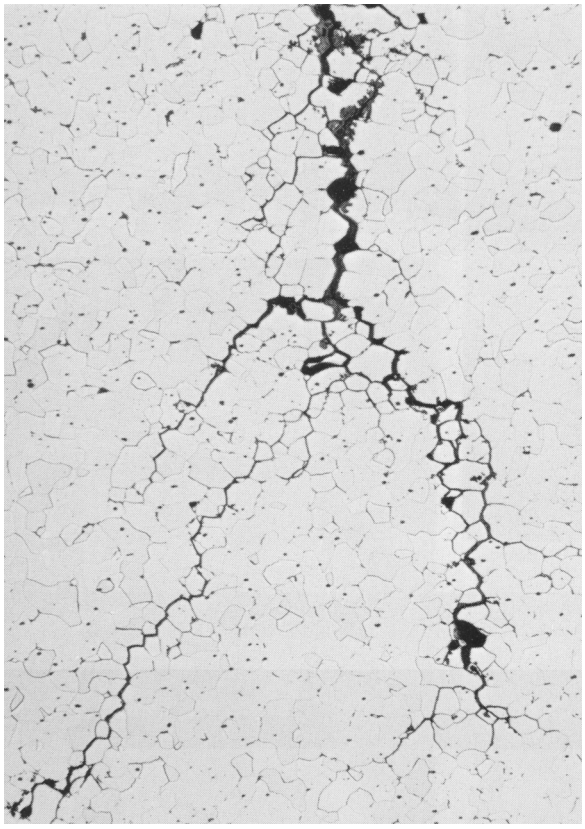


Abbildung 32: Interkristalline Spannungsrisskorrosion [97]

Elektronenmikroskopisch sind unter dem REM bei transkristallinen Rissen Quasispaltbrüche feststellbar, die z. T. charakteristische feder- oder fächerartige Strukturen in Bruchfortschrittsrichtung aufweisen [6] (vgl. Abb. 33).

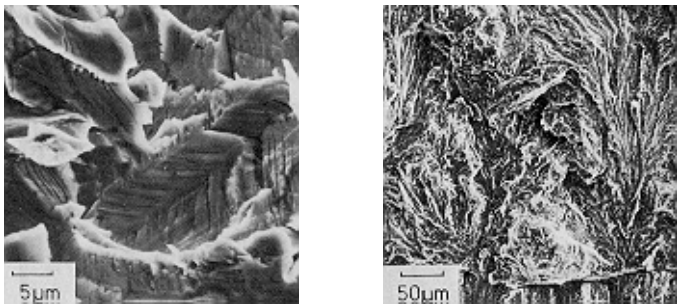


Abbildung 33: feder- oder fächerartige Strukturen [6]

Bei interkristallinen Rissen liegen dagegen glatte Korngrenzflächen ohne Duktilitätsmerkmale vor [6] (vgl. Abb. 34).

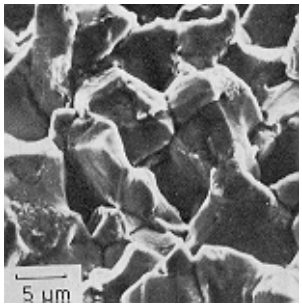


Abbildung 34: glatte Korngrenzflächen ohne Duktilitätsmerkmale [6]

Transkristalline Spannungsrisskorrosion tritt fast immer bei nichtrostenden Stählen in halogenidhaltiger Lösung auf, während die interkristalline Variante bei un-/niedriglegierten Stählen in Laugen und nitrathaltigen Lösungen beobachtet wird.

Bei der *analytischen Untersuchung* sind im allgemeinen keine Korrosionsprodukte feststellbar, was ein wichtiges Kriterium dieser Korrosionsart darstellt [78]. Je nach Angriffsmedium sind bei unlegierten Stählen entweder Nitrate oder Hydroxyde feststellbar, während bei passivierenden Werkstoffen Halogenide zu finden sind [2, 79].

Nachfolgend werden die wichtigsten Medien aufgelistet, die bei bestimmten Werkstoffen Spannungsrisskorrosion hervorrufen [5, 6, 56, 83, 110]:

- bei un-/niedriglegierten Stählen:
  - + in stark alkalischen (Laugensprödigkeit) und in Nitratlösungen (interkristalline Rissbildung), z. Bsp.: NaOH, NH_4NO_3, $Ca(NO_3)_2$
  - + H_2O+H_2S
  - + reines Wasser
  - + reines NH_3
- bei hochlegierten austenitischen Stählen:
  - + in chloridhaltigen Lösungen: Mindesttemperatur von etwa 60 °C meistens erforderlich, transkristalline Rissbildung
  - + in Alkalihydroxid-Lösungen: Trans- oder interkristalline Rissbildung
  - + in sauerstoffhaltigem Hochtemperaturwasser: Interkristalline Rissbildung bei sensibilisiertem Material
  - + NaOH
  - + H_2S
- Nickelbasis-Legierungen:
  - + in Alkalihydroxid-Lösungen: Trans- oder interkristalline Rissbildung
  - + in reinem Hochtemperaturwasser: „Couriou“-Effekt: werkstoffabhängig, lange Inkubationszeiten, Spaltbedingungen wirken sich negativ aus
- Kupferbasis-Legierungen
  - + Ammoniakhaltige Lösungen
  - + Nitrit-Lösungen

- Aluminiumbasis-Legierungen:
  + Insbesondere halogenhaltige Lösungen (Chloride): Interkristalline Rissbildung
- Titanbasis-Legierungen:
  + Chloridhaltige wässrige und organische Lösungen: Rissbildung häufig nur beim Vorliegen scharfer Kerben
- Magnesiumlegierungen:
  + Chloridlösungen

3.2.14. Schichtkorrosion

Die Schichtkorrosion tritt bei Aluminumlegierungen der Gruppe AlZnMg auf, wobei *makroskopisch* ein Aufblättern des gewalzten Werkstoffes in Schichten parallel zur Oberfläche feststellbar ist. Zwischen den Schichten bilden sich metallisch matte, terrassenförmige, faserige und raue Trennflächen. Die Korrosionsprodukte sind schichtartig angeordnet. *Lichtmikroskopisch* folgt der Angriff dem Verlauf in Zeilenform ausgewalzter, intermetallischer Verbindungen oder dem Verlauf von Seigerungen [59].

3.2.15. Spongiose

Die wohl bekannteste selektive Korrosionsart ist die Spongiose, die fast ausschließlich bei lamellar erstarrtem Grauguss gefunden werden kann. Lediglich in einer Quelle wurde angemerkt, dass sie auch in globularem Grauguss auftritt [99]. Meist handelt es sich um gusseiserne Rohr- oder Abflussleitungen, die in der Erde oder im Meerwasser liegen. *Makroskopisch* liegen nach der Entfernung einer eventuell vorhandenen Rostschicht dunkel gefärbte Bereiche vor, die unterschiedlich verteilt sind und verschiedene Ausdehnung und Tiefe aufweisen [99]. Die Form des Bauteils ist äußerlich meist erhalten, wobei die mechanische Festigkeit der betroffenen Stellen so niedrig ist, dass sie mit einem Messer geschnitten werden können [59]. Außerdem verlieren sie ihren metallischen Klang [99]. Bei einem Querschnitt durch das Bauteil kann eine graue Schicht beobachtet werden, die über unberührtem Metall liegt (vgl. Abb. 35).

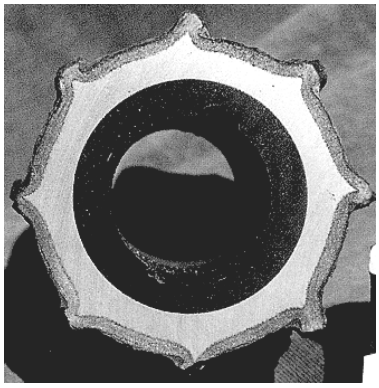


Abbildung 35: Querschnitt durch ein Bauteil mit Spongiose [99]

Lichtmikroskopisch kann ein Graphitskelett festgestellt werden, dessen Hohlräume teilweise mit Korrosionsprodukten gefüllt sind [111]. Bei der *analytischen* Untersuchung können erhöhte Kohlenstoffgehalte in den angegriffenen Bereichen nachgewiesen werden [59], wäh-

rend das Medium hauptsächlich aus weichem Wasser, schwachen Säuren, Wässern mit niedrigem Gehalt an Schwefelwasserstoff (< 1 ppm) oder salzhaltigem und gutleitendem Wasser besteht [99].

3.2.16. Entaluminierung und Entzinkung

Die Entaluminierung findet man bei Aluminiumbronzen mit einem Aluminiumgehalt von 5 % und mehr [59]. Sie weist einige Gemeinsamkeiten mit der Entzinkung auf, die bei Messing mit höheren Zinkgehalten von über 30 % auftritt. *Makroskopisch* findet man bei beiden einen schwammigen Kupferniederschlag, wobei die Bauteilform auch bei fortgeschrittenem Angriff erhalten bleibt. Zudem ist bei beiden ein selektiver Angriff nachweisbar, wobei die Oberflächenzone aus schwammigem Kupfer auf porösem α-Skelett besteht, unter dem sich deutlich abgesetzt ein intaktes α-β-Mischgefüge befindet. Die Angriffsbereiche sind bei der Entaluminierung unterschiedlich verteilt und besitzen verschiedene Ausdehnung und Tiefe. Die Entzinkung wurde dagegen aufgrund ihrer Auftretensfläche in die Pfropfen- und die Lagenentzinkung aufgeteilt. Die Pfropfenentzinkung tritt örtlich begrenzt, hauptsächlich an horizontalen Wasserleitungen auf, wobei der Angriff auf Gebiete unter Ablagerungen in 6-Uhrlage begrenzt ist [99]. Manchmal werden Pfropfen durch den Leitungsdruck herausgeschleudert. Bei der Lagenentzinkung findet sich ein gleichmäßiger Angriff auf der gesamten Oberfläche. Dabei ändert sich die Farbe vom Goldgelb des Messings zum Rot des elementaren Kupfers [99]. Aufgrund der flächenmäßigen Korrosion, die dazu führt, dass keine Stützflächen mehr vorhanden sind, sinkt die mechanische Festigkeit, woraus folgend das betroffene Bauteil bei Belastung leicht bricht.

3.2.17. Filiformkorrosion

Eine sehr seltene Korrosionsart, die dennoch wegen ihrer eindeutigen Kennzeichen aufgenommen wurde und nur unter Oberflächenschutzschichten wie Lacken auftritt, ist die Filiformkorrosion. Sie zieht einen Faden von ca. 2 mm Breite über das Bauteil, der einen aktiven blauen Kopf besitzt, der einen rötlich-braunen Schwanz hinter sich herzieht. Diese Korrosionsart ist ungefährlich, da sie zu keiner Schwächung des Bauteils führt, sondern nur das Oberflächenaussehen negativ beeinflusst [112].

3.3. Bewertung hinsichtlich der Expertensystemeignung

Kapitel 3.2. zeigt, dass das Fachgebiet der elektrochemischen Korrosion in einzelne Schadenmerkmale und Schadenmechanismen eingeteilt werden kann, die dann mit Hilfe von in der Schadenanalyse anerkannten Untersuchungsverfahren strukturiert werden können. Damit wurde nachgewiesen, dass die Korrosion im Rahmen einer Wissensrepräsentation systematisiert werden kann, was die Grundlage eines Expertensystems darstellt.

4. Lücken im bisherigen System der Wissensakquisition

Aus dem Stand der Kenntnisse in Kapitel 2 wird ersichtlich, dass es für eine rechnergestützte Schadenanalyse im Bereich der Korrosion bereits bedeutende Vorarbeiten auf den Gebieten der methodischen Vorgehensweise in der Schadenanalyse, der Erstellung von Expertensystemen und der Wissensrepräsentation gibt. Auch bei der Systematisierung des Korrosionswissens wurden Fortschritte erzielt, wobei sich diese Systeme immer auf einen Teilbereich der Korrosion konzentrieren oder die einzelnen Korrosionsarten nur getrennt betrachten. Bis jetzt ist noch kein Versuch bekannt, der sich damit beschäftigt, ein Korrosionsgesamtsystem zu erstellen, das die Auftretensweisen und die Erscheinungsformen der verschiedenen Korrosionsarten in Zusammenhang bringt, so dass ein System erstellt werden kann, das mit Hilfe eines Expertensystems eine rechnergestützte Schadenanalyse ermöglicht.

Dazu müssen die drei Bereiche „Systematische Schadenanalyse“, „Expertensystemrealisierung“ und „Gesamtsystem Korrosion“ unter besonderer Berücksichtigung der Korrosionszusammenhänge kombiniert werden.

5. Realisierung einer rechnergestützten Schadenanalyse

Zur Realisierung der rechnergestützten Schadenanalyse wurde zunächst der Problemtyp analysiert und danach festgelegt, welche Wissensrepräsentation zur Erfassung dieses Problems nötig ist. Nach der Auswahl eines für die gewählte Wissensrepräsentation geeigneten Programmiertools wurde eine entsprechende Systematisierung und die Implementation auf dem Rechner vorgenommen.

5.1. Phasen einer Expertensystementwicklung

Die Entwicklung eines Expertensystems vollzieht sich in 5 Phasen [113, 114] (vgl. Abb. 36). In der Identifikationsphase werden die vorliegenden Probleme spezifiziert und die Ziele des Expertensystems definiert. In der Konzeptionsphase werden die Fakten des Fachgebietes analysiert, wie es in Kapitel 3 beschrieben wurde. Die Formalisierungsphase dient dazu, die Wissenseinheiten des Fachgebietes in geeignete Wissensrepräsentationsmechanismen (vgl. Kap. 2.2. und Kap. 5.5.) umzusetzen, eine Problemlösungsstrategie zu entwickeln und ein Programmierwerkzeug auszuwählen (vgl. Kap. 5.4.), das den Anforderungen des Wissensgebietes genügt. Mit Hilfe des gewählten Programmierwerkzeuges wird in der Implementierungsphase die Programmierung eines Prototypen vorgenommen, der in der Testphase bezüglich der Zielforderungen überprüft wird. Die Iterationsschleifen weisen auf die schrittweise Erweiterung und Verbesserung des Prototypen hin.

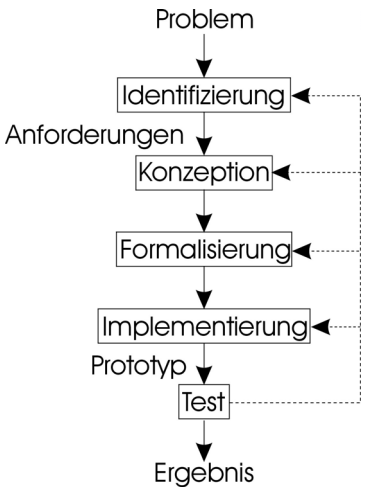


Abbildung 36: Phasen einer Expertensystementwicklung [114]

5.2. Feststellung des Problemtyps

Um ein Expertensystem zu erstellen, muss zuerst der vorliegende Problemtyp analysiert werden, damit die passende Wissensrepräsentation und geeignete Inferenzmechanismen gewählt werden können.

Soll ein Schaden analysiert werden, so liegen die Schadenmerkmale z.B. in Form geborstener Maschinenteile vor. Zu den Merkmalen eines Schadens müssen aber auch alle relevanten Umfeldinformationen des eigentlichen Schadens hinzugenommen werden, die aus der Betriebs-

weise, der Konstruktion, der Wartung etc. des betrachteten technischen Systems ermittelt werden können. Dazu muss das System ganzheitlich betrachtet werden, weshalb eine Schnittstelle zwischen relevanten und nicht relevanten aber bestimmbaren Merkmalen zu Beginn einer Schadenanalyse meist noch nicht angegeben werden kann. Die für die Schadenanalyse relevanten Merkmale kristallisieren sich oft erst während der Problemlösung heraus. Betrachtet man den Schaden als aufgeklärt, so kennt man alle relevanten Schadenmerkmale und die Ursache.

Bei der Analyse eines Schadens führt man streng genommen keine Analyse, sondern eine Synthese durch, indem man eine Vielzahl von Schadenmerkmalen und Umfeldinformationen in Beziehung zueinander setzt und sie schlussfolgernd auf eine oder mehrere auslösende Faktoren (Schadenursache) zurückzuführen versucht. In der Terminologie der Expertensysteme findet man für derartige Probleme den Begriff Klassifikation bzw. den aus früheren medizinischen Expertensystemen übernommenen Begriff Diagnostik [23, 115, 116]. Dabei wird der Begriff Diagnose in der Literatur gelegentlich mit dem unscharf verwendeten Begriff Ursache gleichgesetzt. So versteht man in der Terminologie des Expertensystems MYCIN unter einer Diagnose die Identifizierung einer bestimmten Krankheit, die „ursächlich“ für die vorgefundenen Krankheitssymptome verantwortlich ist, wobei gelegentlich außer acht gelassen wird, dass eine Krankheit natürlich kein Kausalereignis ist, sondern ebenfalls Ursachen besitzt [117]. In der Terminologie der Schadenanalyse entspräche dies der Bestimmung der Schadenart. Möchte man den Begriff Diagnose auch in der Schadenanalyse inhaltlich eindeutig verwenden, so ist es sinnvoll, wenn man Schadenursachen als Enddiagnosen und Schadenarten als Zwischendiagnosen bezeichnet. Die Schadenmerkmale, die zusammen das Schadenbild ergeben und die relevanten Umfeldbedingungen kann man analog zur Medizin als Symptome bezeichnen.

Im Vergleich zu vielen anderen Diagnoseaufgaben, zu deren Lösung bereits Expertensysteme eingesetzt werden, zeichnet sich das Wissensgebiet des zu erstellenden Systems dadurch aus, dass man es nicht mit einem bestimmten Diagnoseobjekt zu tun hat, sondern dass allgemeine Schadenverläufe analysierbar und für eine Gruppe technischer Systeme bestimmte Schadenursachen diagnostizierbar sein sollen.

5.3. Wahl der Wissensrepräsentation

Abstrahiert man die in der Konzeptions- und Formalisierungsphase durchzuführenden Tätigkeiten, so handelt es sich dabei um die Entwicklung eines Modells eines Teilbereichs der realen Welt auf dem Rechner [118]. Bei dieser Übertragung auf eine Modellebene darf nicht übersehen werden, dass eine vollständige realitätstreue Abbildung nicht möglich ist. Der Teil, der dabei verloren geht, wird als KI-Lücke bezeichnet [20]. Sie beruht darauf, dass ein reales System aus einer „offenen“ in eine „geschlossene“ Welt abgebildet wird, deren Detaillierungsgrad und –umfang durch den Expertensystementwickler determiniert ist [42]. Dabei müssen zwangsweise bestimmte Abstraktionen vorgenommen werden, da das System sonst unter Umständen bereits in Details so umfangreich wäre, dass es die Rechner- und Entwicklerkapazität leicht überschreiten könnte. Ein Beispiel dafür ist die Ausführung aller Möglichkeiten, die Spannungen hervorrufen können, die zu Spannungsrisskorrosion führen. Beispielsweise kann dies durch fertigungsbedingte Eigenspannungen, eine thermische Beauf-

schlagung des Bauteils oder durch eine mechanische Beanspruchung aufgrund einer beschädigten Befestigungsvorrichtung passieren. Diese Aufzählung könnte beliebig detailliert und ergänzt werden, was jedoch den Systemrahmen sprengen würde, weswegen eine bestimmte Lücke in kauf genommen werden muss, die der Systemanwender durch seine Erfahrung und eine geeignete Interpretation der Fragen überbrücken kann.
Das Ziel jeder Wissensrepräsentation ist, diese Informationsreduktion möglichst zu minimieren. Um dieses Ziel zu erreichen, wurde eine hybride Wissensrepräsentation gewählt, da sie im Zusammenspiel von Objekten und Regeln eine gute Abbildung der Realität ermöglicht (vgl. Kap. 2.2.4.). Dabei war ein besonders wichtiger Punkt die leichte Erweiterbarkeit des Systems durch die objektorientierte Programmierung, da es dadurch möglich ist, die KI-Lücke, die jedes System hat, immer weiter zu schließen. Außerdem ist sie anders als der prozedurale Programmierstil, der sich auf die sequentielle Abarbeitung von Funktionen stützt [158], sehr übersichtlich und modular aufgebaut, so dass Teile des Programmcodes einfach in andere Programmteile übernommen werden können, was dazu benötigt wird, für bestimmte Anwendungsgebiete abgewandelte Systeme erstellen zu können, ohne alles neu programmieren zu müssen.

5.4. Auswahl einer Programmierumgebung

Angesichts der großen Anzahl von Programmiermöglichkeiten, die im Stand der Technik aufgezeigt wurden (vgl. Kap. 2.2.5.), stellte sich die Frage, welche für die rechnergestützte Schadenanalyse gewählt werden soll.
Einen Anhaltspunkt dafür liefert die Faustregel von Barrett & Beerel [119]:

> „Use a shell if you can,
> an environment where you should,
> and an AI-language where you must.“

Dementsprechend war es das Ziel, für die RSA eine Shell einzusetzen. Folglich wurde die Expertensystementwicklungsshell Nexpert Object ausgewählt, die allgemein als sehr leistungsfähig gilt [120].
Nach Aussage von Neuron Data, dem Entwickler der Shell, war es das Ziel, ein Programm zu erstellen, das es dem Experten ermöglicht, ein Expertensystem ohne Programmierkenntnisse zu entwickeln, ohne Funktionseinschränkungen aufgrund seiner Unkenntnis in Kauf nehmen zu müssen [121], was genau den Anforderungen entsprach.

Im folgenden werden die Vorteile von Nexpert Object, die zu einer Auswahl des Programms geführt haben, kurz aufgezählt. Es wird darauf verzichtet das Programm mit Konkurrenzprodukten zu vergleichen, da dies den Rahmen dieser Arbeit sprengen würde.

Wissensmodellierung

Es handelt sich um ein hybrides System, da sowohl Regeln als auch eine objektorientierte Wissensmodellierung unterstützt werden.

Das Zusammenspiel dieser beiden Ebenen zeigt Abbildung 37:

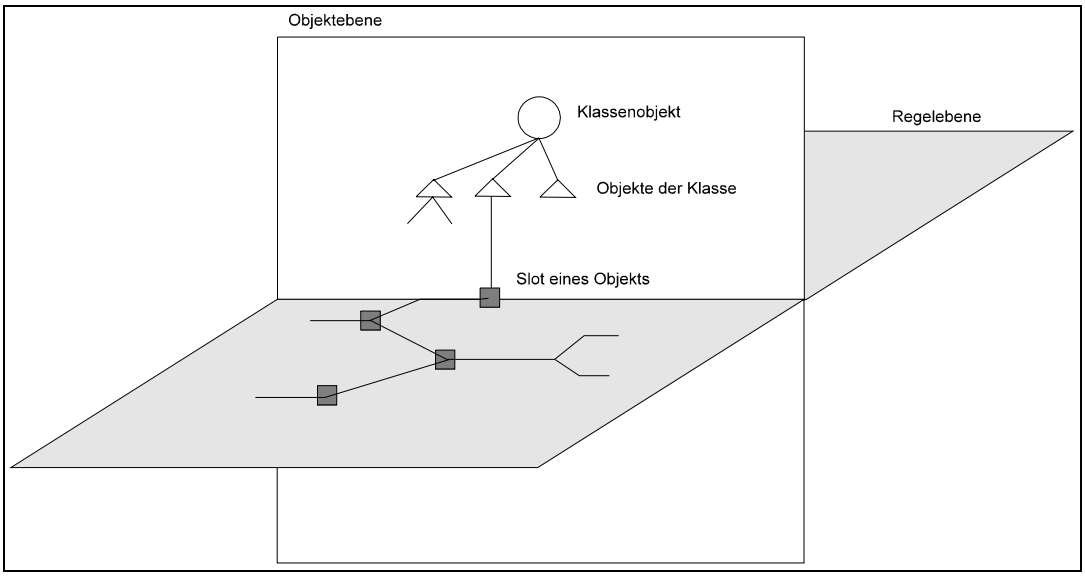


Abbildung 37: Ebenen der Wissensrepräsentation eines hybriden Systems [42]

Auf der einen Ebene befindet sich die objektorientierte Wissensrepräsentation, deren Werte in einzelnen Slots abgelegt sind. Mit diesen Slots werden verschiedene Regeln aufgebaut, die somit die Regelebene bilden und auf diese Weise mit der Objektebene verknüpft sind. Aufgrund der in der Objektebene enthaltenen Werte wird in der Regelebene entschieden, welche Aktionen als nächstes auszuführen sind.
Man kombiniert die einfache Wissensmodellierung der Objektorientierung mit den umfangreichen Aktionsmöglichkeiten von Produktionsregeln.

Benutzerfreundlichkeit

Nexpert Object ist fast völlig graphisch aufgebaut. Es bietet Editoren, sowohl um Regeln als auch Objekte zu erstellen und ihre Eigenschaften zu modifizieren. Dabei verfügt das Programm über die angenehme Eigenschaft, dass es selbst die Verbindungen zwischen den Ebenen herstellen kann [122].
Des weiteren verfügt es über zahlreiche kontextsensitive Menüs, so dass Fehleingaben und lange Suchaktionen vermindert werden, da man nicht durch an der entsprechenden Stelle unnötige Auswahlmöglichkeiten abgelenkt wird.
Die bereits eingegebenen Daten und Funktionen können mit Hilfe von Browsern (optischen Übersichten der gewünschten Informationen) und Listen leicht auf ihre Richtigkeit überprüft werden.
Ebenfalls erwähnenswert ist, dass ein Rapid Prototyping durchführbar ist. Das bedeutet, dass man das Expertensystem nicht völlig fertig stellen muss, um es testen zu können, sondern dass an jeder beliebigen Stelle der Eingabe ein Test durchgeführt werden kann, ob das System so läuft, wie es gewünscht wird. Das hat den Vorteil, dass, falls man sich auf einem Irrweg befindet, viel Entwicklungszeit gespart werden kann, da man den Fehler frühzeitig bemerkt.

Außerdem können damit ohne großen Zeitaufwand neue Möglichkeiten der Programmierung und der Systematisierung getestet werden, was eine verstärkte Innovation ermöglicht [40].
Somit präsentiert sich Nexpert Object als relativ benutzerfreundliches Programm, was aber dadurch geschmälert wird, dass die Vielzahl der Features sehr groß ist. Das bedeutet, dass eine lange Einarbeitungsphase nötig ist, um sie zu nutzen und überhaupt festzustellen, welche Möglichkeiten für eine Aufgabenstellung benötigt werden.

Die Regelebene

Die Möglichkeiten der Regelebene sind sehr umfangreich und erleichtern somit dem im Programmieren ungeübten Experten die Erstellung eines Expertensystems. Die Regeln können sehr einfach und logisch über den sogenannten Regeleditor eingegeben werden. Eine Regel kann aus folgenden Bestandteilen aufgebaut sein (vgl. Abb. 38):

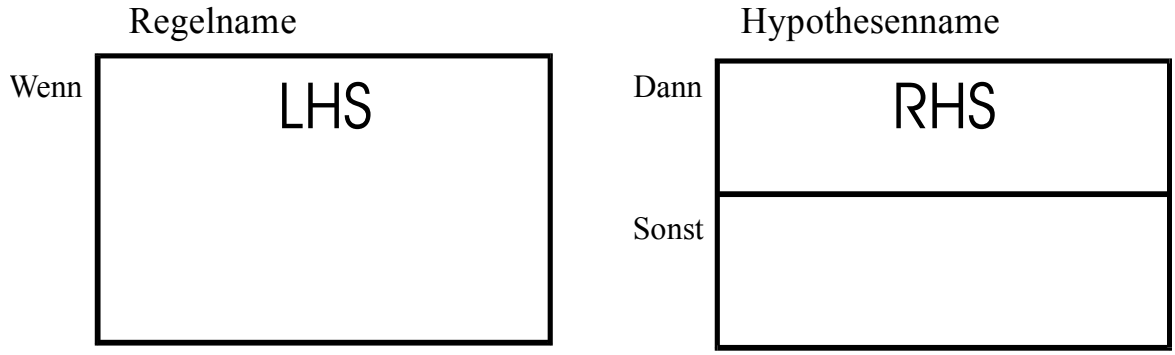


Abbildung 38: Regelstruktur in Nexpert Object [123]

Das besondere dabei ist, dass die Nexpert-Object-Regeln nicht nur reine Wenn-Dann-Anweisungen sind, sondern auch die Möglichkeit eines Sonst-Teiles bieten. Außerdem können in ihnen nicht nur Objekte, sondern auch Methoden eingegeben werden, so dass sie sowohl deklaratives als auch Metawissen darstellen können (vgl. Kap. 2.2.3.-2.2.4.).
Weiterhin hat jede Regel einen Hypothesennamen, unter dem verschiedene Regeln, die den gleichen Kontext haben, zusammengefasst werden können. Sie bilden damit eine so genannte Wissensinsel, die es erleichtert, eine gefundene Lösung genauer und schneller einzugrenzen, da nur noch die Regeln durchsucht werden, die mit der festgestellten Hypothese zusammenhängen [121].

Die Objektebene

Nexpert Object unterstützt zusätzlich zu den sehr umfangreichen Darstellungsmöglichkeiten mit Regeln die Möglichkeit, eine Modellierung über Objekte vorzunehmen.
Es können Objekte mit beliebig vielen Eigenschaften dargestellt werden. Diese Objekte können in Klassen und Subklassen zusammengefaßt werden, so dass eine sehr strukturierte Darstellung möglich ist, was den Vorteil hat, dass man bei eventuellen Änderungen nicht lange suchen muss. Innerhalb eines solchen Baumes werden nahezu alle Vererbungsmöglichkeiten

unterstützt, weswegen Strukturen sehr einfach eingegeben werden können, da gleiche Wissensteile nicht immer wiederholt werden müssen.
Eine weitere Beschreibungsmöglichkeit der einzelnen Objekt-Eigenschaftspaarungen sind die Meta-Slots [124], mit denen die einzelnen Slots genauer charakterisiert werden können. Mit Hilfe von Meta-Slots ist es möglich, eine Verbindung zwischen Objekt-Eigenschaftspaarungen mit der graphischen Oberfläche herzustellen. Es kann eingestellt werden, an welcher Stelle der Sitzung und mit welcher Frage ein Slot abgefragt wird. Diese Abfrage erscheint dann automatisch, wenn ein Slot in der Wissensbasis aufgerufen wird, was zu einer größeren Automation der Wissensabfrage führt und den Programmierer erheblich entlastet. Diese Meta-Slots stellen ein sehr mächtiges Hilfsmittel dar, um Metawissen in ein Expertensystem zu implementieren. Außerdem sind sie die Grundlage für die Programmiertechnik der dynamischen Screens (vgl. Kap. 5.6.).

Die Inferenzmaschine

Nexpert Object verfügt über eine sogenannte Agenda, auf die alle Regeln in der Reihenfolge gesetzt werden, in der sie abgearbeitet werden sollen. Die Inferenzmaschine, zu der die Agenda gehört, steuert, welche Regeln auf diese Agenda gesetzt werden. Das geschieht mit Hilfe verschiedener Inferenzmechanismen, die wiederum verschiedene Prioritäten besitzen, wie Abbildung 39 zeigt:

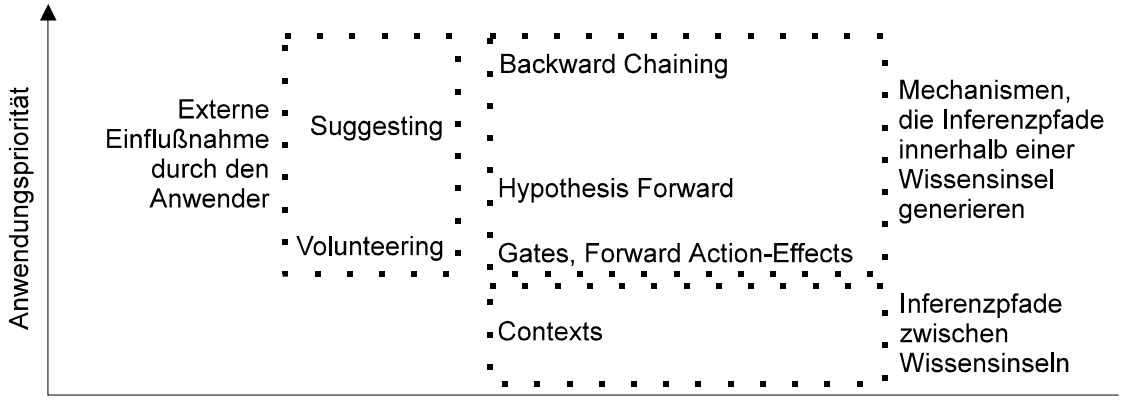


Abbildung 39: Anwendungsprioritäten der Entstehung von Inferenzpfaden in Nexpert Object [42]

Die wichtigsten Mechanismen werden im nachfolgenden kurz erklärt, um dem Leser einen Überblick zu vermitteln, wie man künstliche Intelligenz simulieren kann.
Der erste und wichtigste Mechanismus ist die Rückwärtsverkettung (Backward Chaining). Er beruht darauf, dass im Wenn-Teil auch Hypothesen, also andere Regeln, als Bedingungen eingetragen werden können. Bevor die Regel weiter abgearbeitet werden kann, muss diese Hypothese zuerst auf ihren Wert geprüft werden. Falls dieser noch nicht feststeht, müssen ihre Prämissen überprüft werden, was im Falle des Vorhandenseins einer weiteren Hypothese wiederum einen Schritt zurück zu dieser Hypothese bedeutet. Somit kann man beliebig weit im Regelwerk zurückgehen, bis der Wert der ersten Hypothese gefunden worden ist.
Ein weiterer Weg, auf dem man Verbindungen zwischen einzelnen Regeln herstellen kann, ist es, dem System eine Hypothese vorzuschlagen („suggest“). Im Gegensatz zu den anderen

Inferenzmechanismen handelt es sich hierbei um eine Vorgehensweise, die immer vom Benutzer ausgelöst wird. Das heißt, er setzt eine Regel, die er beachtenswert findet, „von Hand“ auf die Agenda.
Im Gegensatz zur Rückwärtsverkettung gibt es auch eine Vorwärtsverkettung (Hypothesis forward) von Hypothesen. Wenn eine Hypothese überprüft worden ist, sucht das System nach anderen Regeln, die diese Hypothese enthalten, und arbeitet diese Regeln ab. Falls diese Regel zu einer Hypothese gehört, die mehrere Regeln enthält, werden auch die anderen Regeln geprüft.
Eine für das vorliegende System sehr wichtige Methode zur Regelverknüpfung stellen die sogenannten Gates dar. Sie beruht darauf, dass zwei gleiche Slots in zwei verschiedenen Regeln auftauchen. Wird nun die Hypothese 1 überprüft, gelangt man zu dem betreffenden Slot. Falls der Wert stimmt, wird mit der Regelabarbeitung fortgefahren, während andernfalls die Hypothese falsch ist und das System sich eine neue Regel suchen muss, die es überprüfen kann. Aufgrund der Gates sucht sie nach allen Regeln, die ebenfalls dieses Slot unter ihren Bedingungen haben und überprüft deren Hypothesen. Auf diese Weise kann eine einfache Verknüpfung zwischen den einzelnen Regeln vorgenommen werden, die sicher stellt, dass während der Nutzung des Expertensystems keine Regel übersehen wird, die ein bestimmtes Kennzeichen enthält.
Auf die weiteren Methoden soll nicht weiter eingegangen werden, da sie insbesondere für das vorliegende System keine Bedeutung haben.

5.5. Expertensystemgeeignete Strukturierung des Korrosionswissens

Bei der rechnergestützten Schadenanalyse handelt es sich um eine Kombination der schadenanalytischen Systematisierungshilfen (vgl. Kap. 2.1.2.). Es wurde auf diese bereits geleisteten Vorarbeiten aufgebaut, so dass eine Synthese von graphischen Hilfsmitteln mit einer methodischen Vorgehensweise erreicht wurde.
Die graphischen Hilfsmittel wurden zur Wissensmodellierung verwendet (vgl. Kap. 5.5.2.-5.5.4.), um das Faktenwissen in eine einfach strukturierte Form zu bringen, was die Basis des Rechnereinsatzes darstellt. Außerdem ermöglichen sie in Form von Relevanzbäumen die Darstellung von Metawissen, um die Vorgehensweise des Systems zu verdeutlichen (vgl. Kap. 2.1.2.). Die methodischen Hilfsmittel bilden das Grundgerüst, um eine systematische Schadenanalyse zu erreichen, damit die entsprechenden Schritte, die zu einer Schadenklärung notwendig sind, in der richtigen Reihenfolge und zielgerichtet ausgeführt werden (vgl. Kap. 5.5.1.).

5.5.1. Methodische Vorgehensweise

Jedes Expertensystem beruht auf bestimmten Methoden, die festlegen, wie die Wissensbasis verarbeitet wird. Die Methodik, auf der das System aufbaut, ist zum Großteil für die Struktur des Metawissens, das für die Steuerung eines wissensbasierten Systems entscheidend ist, verantwortlich.

5.5.1.1. Die PROSA als methodische Grundlage

Als Grundlage einer rechnergestützten Schadenanalyse wurde zuerst eine methodische Vorgehensweise gewählt, in die dann das Fachwissen in geeigneter Form implementiert werden konnte. Dafür bot sich die PROSA von Schmitt-Thomas an, da sie der Zielstellung sehr genau entspricht. Sie ermöglicht die Feststellung einer Schadenart oder –ursache und geht dabei anhand einer strengen Systematik vor. Sie zerlegt einen Schaden in seine Einzelkomponenten, so dass daraus eindeutig auf die Schadenart und –ursache zurückgeschlossen werden kann, ohne dass etwas übersehen wird (vgl. Kap. 2.1.2.).

Nachdem sie in langen Jahren ihre Tauglichkeit unter Beweis gestellt hat, war es sinnvoll, die rechnergestützte Schadenanalyse auf ihrer Basis aufzubauen. Das Ergebnis stellt aber nicht nur eine Adaption der PROSA auf dem Rechner dar, was bereits mehrfach versucht wurde, sondern geht aufgrund logischer Verknüpfungen der einzelnen Kennzeichen, die schließlich zu einem nachvollziehbaren Ergebnis führen, über ein reines Anleitungssystem zur systematischen Schadenanalyse hinaus und markiert einen Schritt in Richtung der rechnergestützten Schadenbearbeitung.

5.5.1.2. Verkettungsmöglichkeiten

Um zu einer Lösung eines Schadens zu gelangen, kann man zwei Wege verfolgen, die Vorwärts- oder die Rückwärtsverkettung, weswegen der nächste Schritt die Überlegung war, welcher für die Schadenanalyse der sinnvollere ist.

Vorwärtsverkettung

Im Falle der Vorwärtsverkettung stellt das System dem Nutzer Fragen, die er beantworten muss und die ihn immer näher an die vorliegende Schadenart bringen. Der Ausgangspunkt ist also die völlige Unwissenheit des Gutachters über die Schadenart (vgl. Abb. 40).

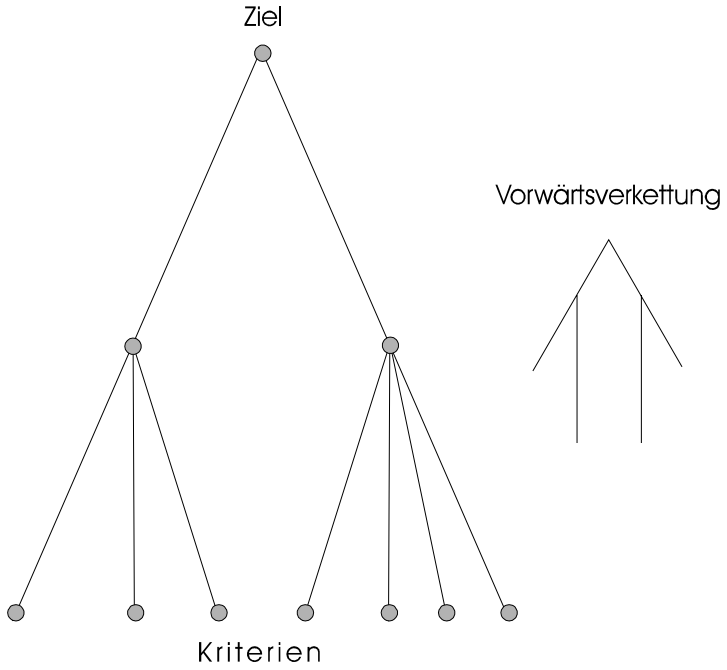


Abbildung 40: Vorwärtsverkettung

Das Problem bei dieser Methode ist, dass der Bearbeiter bei einem größeren System unter Umständen sehr viele Fragen beantworten muss, bis er schließlich zu einem Ergebnis gelangt. Dabei ist es selbstverständlich, dass ein Großteil der Fragen in dem vorliegenden Sachverhalt nicht sinnvoll ist, und somit die gesuchte Schadenart auch auf kürzerem Weg erreicht hätte werden können. Andererseits ermöglicht diese Vorgehensweise ein völlig unvoreingenommenes Herangehen an einen Schadenfall, so dass das Ergebnis nicht durch eventuell falsche Vorbeurteilungen des Gutachters beeinträchtigt wird.
Das Vermeiden unnötiger Fragen kann durch die Programmierweise des Systems stark gefördert werden.

Rückwärtsverkettung

Bei dieser Methode hat der Bearbeiter bereits eine Hypothese, welche Schadenart vorliegen könnte. Seine Anforderungen an das System sind deswegen, dass es ihm eine Abfrage der Kennzeichen, die er überprüfen muss, vorlegt. Es soll ihm eine systematische Vorgehensweise vorgeben, anhand der er vorgehen und seinen Verdacht bestätigen oder verwerfen kann. Dabei muss das System eine vollständige Kennzeichenliste enthalten, so dass ihm weitere Merkmale, die ihm entweder noch nicht bekannt sind, oder die er vergessen hat, angegeben werden (vgl. Abb. 41).

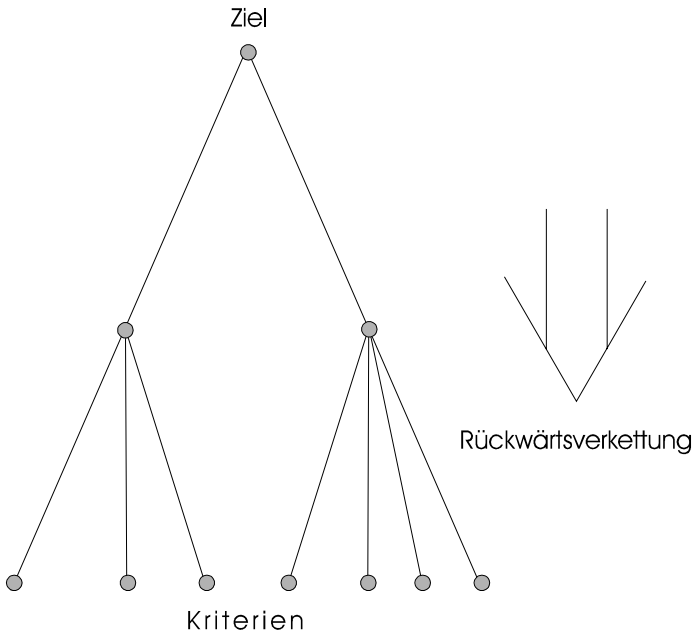


Abbildung 41: Rückwärtsverkettung

Diese Vorgehensweise hat den Vorteil, dass, wenn die Hypothese des Gutachters richtig war, er anhand genau der Kennzeichen, die er braucht, beweisen kann, dass seine Vermutung zutrifft. Andererseits hat der Nutzer im Falle einer falschen Annahme einige Fragen beantwortet, ohne zu einem Ergebnis zu gelangen. Außerdem muss er sich selbständig eine neue Hypothese überlegen, so dass ihm das System keine richtige Hilfe ist.

Für diese Aufgabenstellung benötigt man kein Expertensystem, da eine derartige Liste auch eine normale Datenbank liefern kann.

Nachdem beide Ansätze als Prototypen realisiert worden waren und ihre Funktion einwandfrei war, konnte eine endgültige Entscheidung erst anhand der fertigen Korrosionssystematik getroffen werden. Dabei erwies sich die Vorwärtsverkettung als die bessere Lösung, da aufgrund einer möglichst einfachen und eindeutigen Strukturierung des Systems eine geringe Anzahl von Frageebenen erreicht wurde. Um eine schnellere Eingrenzung zu erreichen, wurde außerdem das Verfahren des Ausschlusses angewandt. Damit wurde die Möglichkeit, dass langwierig ein falscher Weg beschritten wird, nahezu ausgeschlossen, womit der große Vorteil der Vorwärtsverkettung, dass sie auch Nichtfachleuten einen schnellen Einstieg in die Materie bietet, überwog.

5.5.1.3. Berücksichtigung von Unsicherheiten

Wenn man ein wissensbasiertes System aufstellt, muss man sich zwangsläufig mit Unsicherheiten und den Möglichkeiten ihrer Handhabung auseinandersetzen.
Dazu gibt es zwei wichtige Grundarten, die genauer betrachtet wurden:

- wahrscheinlichkeitstheoretische Betrachtung
- fuzzy logic

5.5.1.3.1. Wahrscheinlichkeitstheoretische Betrachtung

Dabei handelt es sich um die Berechnung, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein vom System ermitteltes Ergebnis zutrifft. Beispielsweise wäre ein Ergebnis, das nur eine Wahrscheinlichkeit von 50 % hat, sehr zweifelhaft, während bei 70-80 % schon sehr großes Vertrauen in die Endaussage gesetzt werden könnte.

Um solche Wahrscheinlichkeitsaussagen zu erhalten, müssen alle Teilfragen mit Einzelwahrscheinlichkeiten belegt werden. Dabei kann entweder die Wahrscheinlichkeit ihres Auftretens im Vergleich zu einer anderen Erscheinungsform oder die Wahrscheinlichkeit des gesamten Auftretens bewertet werden. Beispielsweise hätte im zweiten Fall das eindeutige Vorliegen eines Kennzeichens die Wahrscheinlichkeit 100 %.
Im ersten Fall kann eine Beurteilung entweder durch Wahrscheinlichkeiten, die den einzelnen Erscheinungen durch das System zugeordnet werden, oder durch Eingabe von zutreffenden Werten durch den Anwender vorgenommen werden. Dabei ergibt nur die Eingabe durch den Anwender einen Sinn, da das System den vorliegenden Fall nur anhand dieser Eingaben bewerten kann.

Beide Vorgehensweisen sind im Fall der Korrosion jedoch nicht besonders sinnvoll.
Eine Vorgabe von festen Wahrscheinlichkeiten ist undurchführbar, da es sich bei Korrosionsschäden im Normalfall um Individualschäden handelt, weil sich nur selten die Parameter voll-

ständig decken, weswegen keine einheitlichen Wahrscheinlichkeiten abgeleitet werden können, da aussagekräftige Messreihen fehlen.
Möglich wären solche Reihen zum Beispiel im Automobilbau, da es sich um eine große Anzahl von Versuchsfahrzeugen handelt. Andererseits sind auch hier die Versuchsparameter nicht eindeutig nachvollziehbar, da jedes Fahrzeug anderen Fahrbedingungen ausgesetzt wird. So stellt es für die Korrosion einen bedeutenden Unterschied dar, ob Kies auf der Fahrbahn langsam überrollt oder so schnell überfahren wird, dass die aufspritzenden Steinchen zu Schäden an Lack oder Unterbodenschutz führen. Im zweiten Fall kommt es logischerweise erheblich schneller und in bedeutend größerem Umfang zu Korrosionserscheinungen. Weitere bei diesem Beispiel schwer zu kontrollierende oder zu simulierende Parameter sind die Verarbeitungsqualität und Unfallschäden.
Man sieht anhand dieses Praxisbeispiels wie schwer es ist, Wahrscheinlichkeiten aufzustellen. Ein Versuch einer derartigen Systematisierung wurde im Bereich der Korrosion von Fontanive [125] und auf dem Gebiet der mechanischen Schäden von März und Weigert [126, 127] vorgenommen. Es wurde jedoch kein System erreicht, mit dem eine wahrscheinlichkeitstheoretische Betrachtung aufgestellt werden kann.
Auch die Möglichkeit von Experimenten scheidet aus, da die Vielzahl der Einflussmöglichkeiten jeglichen Versuchsrahmen sprengen würde. Man könnte sich zwar mit der Taguchi-Methode [128] behelfen, wobei das Problem auch damit nicht fassbar ist, da man dafür zuerst die Einflussgrößen definieren müsste, was unter Berücksichtigung der zahlreichen Umwelteinflüsse nicht möglich ist. Eine Verwendung von Wahrscheinlichkeiten ist somit für ein derart umfassendes System, das mit der vorliegenden Arbeit aufgestellt wurde, nicht geeignet. Ein Einsatz ist lediglich bei genau eingegrenzten Systemen möglich.

Eine Eingabe durch den Anwender bei der zweiten Methode ist ebenfalls nur bedingt sinnvoll, da eine derartige Vorgehensweise wiederum mit der sensorischen Unsicherheit der verschiedenen Gutachter belastet wäre und somit keine vollständig nachvollziehbare Aussage treffen würde. So wären je nach Gutachter sehr verschiedene Wahrscheinlichkeiten einer Aussage möglich. Um dies zu vermeiden, wurde eine derartige Eingabeart ausgeschlossen.

Stattdessen wurde eine Einordnung der Kennzeichen in hard und soft signs vorgenommen. Solche Kennzeichen, die unbedingt vorliegen müssen oder eindeutig feststellbar sind, wurden zu hard signs, während Merkmale, die die Schadendiagnose nur unterstützen oder nur schlecht identifizierbar sind, soft signs sind. Diese Vorgehensweise wird durch die Ansicht von Hoffelner unterstützt, dass es gegenwärtig besser ist, Regeln möglichst pragmatisch durch expertenfestgelegte Fakten aufzubauen als zu viele Unsicherheiten einzubauen [129]. Es empfiehlt sich vielmehr, wie in Kapitel 7. ausgeführt, die Verwendung eines angepassten, nicht zu tiefen Detaillierungsgrades für die Entscheidungsfindung, so dass der Gutachter die Relevanz seiner Auswahl besser verstehen kann.

5.5.1.3.2. Fuzzy logic

Die fuzzy logic beschäftigt sich mit einer weichen Abstufung der logischen Werte Ja und Nein. Ein Beispiel dafür ist ihr Einsatz in der neuen Generation von Waschmaschinen. Wäh-

rend es früher unabhängig von der zu waschenden Kleidermenge nur die beiden Zustände Ein oder Aus gab, misst die moderne Maschine automatisch mit Hilfe der fuzzy logic, wieviel Wasser und Waschpulver wirklich benötigt wird, so dass ein ökonomischer und vor allem ökologischer Einsatz gewährleistet ist. Es können also nicht nur die Werte An und Aus, sondern auch Wenig, Mittel oder Viel und weitere Zwischenstufen realisiert werden.

Ein Einsatz der fuzzy logic in einem Expertensystem erwies sich als sehr effektiv, wie in einem Motorschadendiagnosesystem gezeigt wurde. Ein Beispiel dafür ist das Maß, wie weit ein Tassenstößel bei einem Schaden herausgezogen wurde. Man kann nicht nur angeben, ob er ganz oder gar nicht herausgezogen wurde, sondern man kann auch Zwischenwerte verarbeiten, so dass die Beobachtungen eines Gutachters genau berücksichtigt werden können.

Da in der Schadenanalyse teilweise Kennzeichen nicht eindeutig zu erkennen sind, bietet sich die fuzzy logic für die rechnergestützte Schadenanalyse an und wurde deswegen auch in der Systematik verwendet. Ein Beispiel dafür ist die Beschreibung des Korrosionsangriffs. So wird nicht einfach festgestellt, ob ein Angriff vorliegt oder nicht, sondern es sind verschiedene Zwischenstufen wie flächiger, mulden- oder lochförmiger Angriff möglich. Als weiteres Beispiel soll noch die Größe der angegriffenen Fläche angeführt werden.

Zusammenfassend muss jedoch festgestellt werden, dass neue Methoden zur Behandlung von Unsicherheiten in einer Wissensrepräsentation durchaus sinnvoll sind, dass aber generell eine präzise Beschreibung der einzelnen Kennzeichen besser ist und dazu beiträgt, neue Unsicherheiten zu vermeiden.

5.5.2. Erstellung einer Korrosionssystematik

Nach DIN 50900 ist der Begriff Korrosion als Reaktion eines metallischen Werkstoffes mit seiner Umgebung definiert, die eine messbare Veränderung des Werkstoffes bewirkt und zu einem Korrosionsschaden führen kann [98].

Diese einfache Definition vermag nicht die Komplexität der Korrosionsvorgänge und ihrer Klärung zu verdeutlichen. So stellt Fischer folgerichtig fest, dass der Korrosionsfachmann unabhängig von seiner Ausbildung interdisziplinär ausgerichtet sein muss (vgl. Abb. 42) [4].

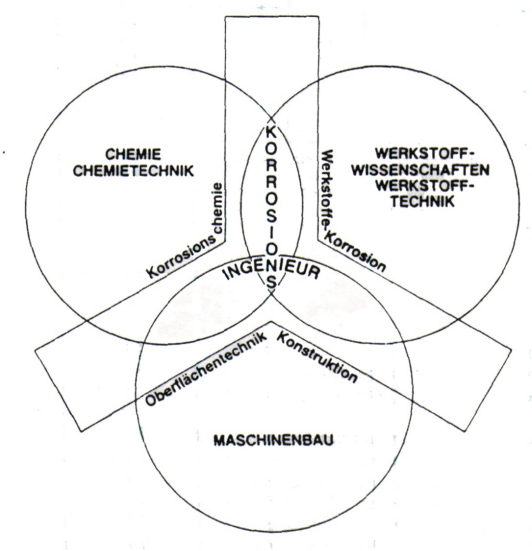


Bild 42: Integration der klassischen Naturwissenschaften im Bereich der Korrosionsschutzes [4]

Die wichtigsten Grundlagen zum Verständnis liefern zweifellos die Elektrochemie und die physikalische Metallkunde, wobei zusätzlich Kenntnisse der Eigenschaften verschiedener organischer und anorganischer Schutzanstriche für den Korrosionsschutz unvermeidbar sind. Auch die mechanischen und konstruktiven Gesichtspunkte sollten weder bei der Schadenanalyse noch bei der prophylaktischen Schadenvermeidung vergessen werden, da ein Großteil der Korrosionsschäden auf einfache konstruktive Fehler zurückzuführen ist. So ist beispielsweise die Kontaktkorrosion hauptsächlich ein konstruktives Problem, da sie bei entsprechender Isolation oder einer geeigneteren Auswahl der Werkstoffe bereits in der Konstruktionsphase vermieden werden könnte. Dennoch treten auch solche Fehler heute noch auf.
Schikorr verdeutlicht diese überaus große Komplexität mit Hilfe des Reaktionsfolgeschemas in Abb. 43 [130], in dem die zahlreichen Vorgänge sowohl im Medium als auch im Werkstoff und an der Phasengrenzfläche, die an der Entstehung eines Korrosionsschadens beteiligt sind, aufgezeigt werden.

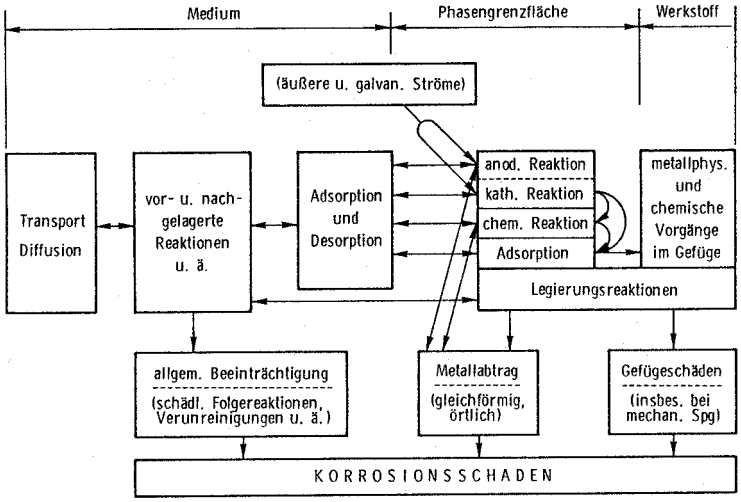


Abbildung 43: Mögliche Reaktionsschritte der Korrosion [131]

Wie bereits in Kap. 2.2.1. festgestellt wurde, liegen die Probleme bei der Erstellung eines Expertensystems nicht in der Rechnerleistung, sondern in der Modellierung des Wissens. Deswegen war es eine Aufgabe dieser Arbeit, eine Korrosionssystematik zu erstellen, die die einzelnen Einflussgrößen berücksichtigt und zu einem Gesamtsystem kombiniert.
Besondere Probleme bereitet das Wissensgebiet der Korrosion dadurch, dass es sich bei dem Wissen, das in das Expertensystem aufgenommen werden soll, nicht um Berechnungen, die mathematisch exakt erfasst werden können, sondern um Erfahrungswissen handelt.

Darum wurde zuerst ein Modell erstellt, das die wichtigsten Parameter enthält, die das Auftreten der Korrosion beeinflussen (vgl. Abb. 44). Dazu wurden bereits bestehende Systematiken [6, 76, 99, 104, 112, 132] und Gutachten [88, 97, 133, 134] ausgewertet (vgl. Kap. 3.). Eine Bestätigung dieses Grundmodells erfolgte im Gespräch mit Experten [55, 71, 72, 73].
Die Einflussgrößen gliedern sich dabei in die Bereiche Werkstoff, Medium und Beanspruchung, die das Korrosionssystem bilden und bei der Schadenklärung berücksichtigt werden müssen.

Abbildung 44: Haupteinflussfaktoren der Korrosion

Die ursprünglich geplante Kombination aller Parameter zu einem Gesamtsystem erwies sich als nicht sinnvoll, da die Komplexität zu stark steigt. Deswegen wurde aus Vereinfachungsgründen eine Dreiteilung vorgenommen, wobei darauf geachtet wurde, dass sich die einzelnen Komplexe ergänzen, um trotzdem ein zusammenhängendes Gesamtsystem zu erhalten.
Der erste Teil besteht aus einer Werkstoff-Mediumsdatenbank, die sich mit den Einflussgrößen Art und Konzentration des Mediums in Verbindung mit der Werkstoffzusammensetzung beschäftigt. Sie dient zur Klärung der generellen Beständigkeit eines Werkstoffes in einem bestimmten Medium.

Der zweite Teil analysiert anhand der restlichen Einflussgrößen in Abbildung 44 den Mechanismus, der zum Schadeneintritt geführt hat, und schließt daraus auf eine Korrosionsart und eine Schadenursache.
Im dritten Bereich des Systems wird anhand der Analyse des Schadenbildes die Korrosionsart ermittelt (vgl. Abb. 45).

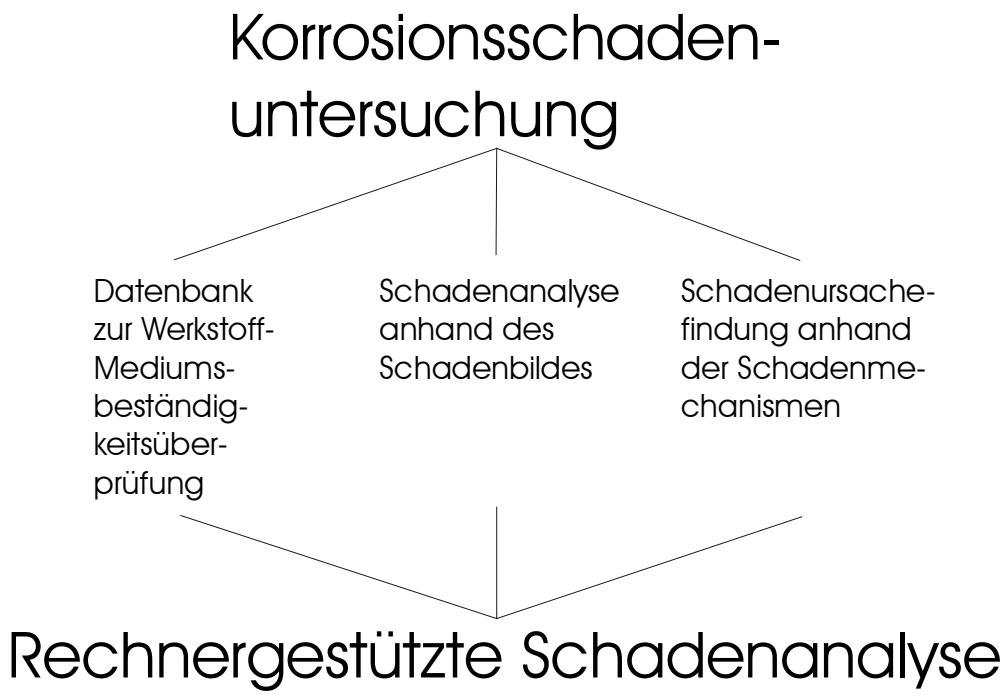


Abbildung 45: Die drei Teilsysteme der rechnergestützten Schadenanalyse

Während es sich bei dem ersten Teil um eine reine Datenbank handelt, die anhand quantitativer Eingaben einen Beständigkeitswert des Werkstoffes auswählt, sind die beiden letzten Teile Expertensysteme, die mit Hilfe der Vorwärtsverkettung anhand verschiedener Fragen, die sich entsprechend der Eingaben des Benutzers ergeben, zu einem Ergebnis gelangen. Es handelt sich somit um interaktive Systeme, die fähig sind, sich einen individuellen Lösungsweg anhand der Angaben zu suchen. Beide Expertensysteme beruhen auf der Aufstellung der elektrolytischen Korrosionsarten in Kapitel 3..

Pourbaix-Diagramme, die sich ebenfalls auf die Beständigkeit eines Werkstoffes in einem Medium beziehen, wobei sie den pH-Wert und das Elektrodenpotential verwenden (vgl. Abb. 46), wurden nicht in die Expertensysteme aufgenommen, da sie in graphischer Form schneller abgelesen werden können. Sie wurden deswegen beispielhaft für einige Werkstoffe in das System eingescannt.

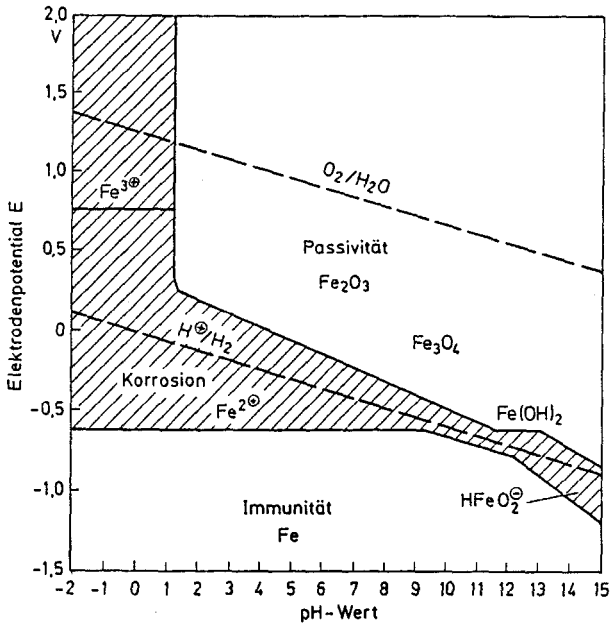


Abbildung 46: Pourbaix-Diagramm [56]

Auch Summenstromdichte-Potentialkurven wurden nicht aufgenommen. Sie können zwar zur Simulation von Schäden verwendet werden [92], sind jedoch für jedes Werkstoff-Mediumssystem spezifisch, so dass ihr Einsatz in einer grundlegenden Systematik zu umfangreich ist.

Bei der Entwicklung des Korrosionsmodells wurde darauf geachtet, dass jederzeit Erweiterungen vorgenommen werden können, um die Anpassung an spezielle Anwendungsfälle zu ermöglichen. Beispielsweise kann die Wissensbasis des Schadenbilder-Expertensystems für bestimmte Werkstoffe spezifiziert werden, ohne dass die Systematik geändert werden muss. Auch im Schadenmechanismen-Expertensystem kann die Anpassung an einen anderen Werkstoff ohne Systemänderung vorgenommen werden.
Es handelt sich somit um ein sehr flexibles System, das für alle Anpassungen offen ist.

5.5.3. Korrosionsschadenanalyse anhand des Schadenbildes
Wie bereits in Kapitel 3. ausgeführt, wurden folgende Schadenuntersuchungsschritte für die Strukturierung des Fachgebietes der Korrosion verwendet.

- Makroskopische Untersuchung
- Lichtmikroskopische Untersuchung
- Elektronenmikroskopische Untersuchung (REM)
- Analytische Untersuchung

Bei der Entwicklung des Systems wurde darauf geachtet, dass die Möglichkeit besteht, weitere Untersuchungsschritte in die Rechnersystematik aufzunehmen, da bei anderen Schadengebieten andere Vorgehensschritte nötig sind wie zum Beispiel bei der Schadenanalyse mechanischer Schäden „Statische Zugprüfungen“.

Im Kapitel 3 wurden die einzelnen Korrosionsarten bereits entsprechend ihrer Erscheinungsmerkmale in diese vier Untersuchungsschritte eingeteilt. Dieses Korrosionswissen wurde nun so gegliedert, dass die einzelnen Kennzeichen im System so beschrieben werden, dass der Anwender sie versteht und die richtige Möglichkeit, die in seinem Fall vorliegt, auswählen kann. Dazu konnten entweder kurze Beschreibungen der Erscheinungen innerhalb eines Untersuchungsschrittes ohne weitere Unterteilung verwendet werden, wie es beispielsweise in der VDI-Richtlinie 3822 [59] vorgenommen wurde, oder es konnte eine Aufsplitterung in sehr kleine Elemente vorgenommen werden, wie es Steiner und Zopf versucht haben [136, 137]. Zum Beispiel würde bei dieser extremen Gliederung die Beschreibung „kraterförmige, häufig scharf begrenzte Vertiefungen“ in drei Einzelpunkte „kraterförmig“, „scharf begrenzt“ und „Vertiefungen“ zerlegt. Dieser Weg wurde nach einer Überprüfung nicht weiter verfolgt, da er entsprechend der vielen ihm immanenten Auswahlmöglichkeiten zahlreiche Abfragen benötigt, was die Wahrscheinlichkeit von Fehleingaben erhöht.
Deswegen wurde ein Mittelweg gewählt (vgl. Abb. 47-56). Der Hauptvorteil besteht darin, dass der Anwender einen besseren Überblick hat und keine Fehleingaben aufgrund von Untersuchungs- oder Beurteilungsfehlern macht, da er besser einschätzen kann, worauf die Frage abzielt. So kann er das Merkmal gezielt untersuchen und es ablehnen oder ihm zustimmen, auch wenn nicht exakt das geforderte Aussehen vorliegt, da einzelne Forderungen beispielsweise aufgrund von mechanischen Beschädigungen nicht mehr erkennbar sind oder von Anfang an nicht besonders ausgeprägt waren. Dem Anwender wird somit mehr Entscheidungsfreiheit belassen, wobei darauf geachtet wurde, die einzelnen Merkmale so genau zu beschreiben, dass die negativen Einflüsse durch die sensorische Unsicherheit und die linguistische Unschärfe möglichst gering sind.
Aus dem gleichen Zweck und zusätzlich, um den Lerneffekt zu vergrößern, wurden bei der Bestimmung der Korrosionsarten alle Kennzeichen gesammelt, selbst wenn sie nicht unbedingt bei allen Schäden dieser Art feststellbar sind, da sich dem Anwender die überzähligen Merkmale einprägen und er somit gerüstet ist, wenn sie wirklich auftauchen sollten. Um solche Kennzeichen verwenden zu können, wurde die Einteilung der Merkmale in soft und hard signs vorgenommen. Ein eindeutiges Kennzeichen, das bei einem Schaden immer vorliegen muss, ist ein hard sign. Ein Beispiel dafür sind die nadelstichartigen Anfressungen bei der Lochkorrosion, die sich stark von ihrer Umgebung abgrenzen, so dass der Angriff nur im Loch stattfindet. Dagegen ist die Tatsache, dass bei Niet-, Klebe- und ähnlichen Nähten Verbreiterungen des Spaltes auftreten, da die sich bildenden Korrosionsprodukte ein größeres Volumen einnehmen, ein soft sign, weil dies nicht bei jeder Spaltkorrosion auftritt. Somit würde eine Aufnahme in die hard signs dazu führen, dass die Korrosionsart deswegen abgelehnt wird, obwohl sie eigentlich zutrifft. Als weiches Kennzeichen dagegen dient es dazu, dem Anwender größere Sicherheit bei seiner Entscheidung zu geben, wenn es vorliegt, während ein Nichtvorliegen keine Auswirkungen hat.

Diese Systematisierung eignet sich sehr gut für eine Datenbank, in der die Kennzeichen einer Schadenart abgefragt werden können. Da es aber das Ziel war, eine Abfragesystematik zu erstellen, die es dem Anwender ermöglicht, mit Hilfe seiner Annahmen Schritt für Schritt zu

einer Lösung zu gelangen, wurden die einzelnen Korrosionsarten verknüpft, womit ein Schritt in Richtung künstlicher Intelligenz in Form eines Expertensystems vorgenommen wurde.
Als Ausgangspunkt wurde die makroskopische Erscheinung des Schadens gewählt, da diese Beurteilung meist ohne größeren Untersuchungsaufwand vorgenommen werden kann. Daraus folgend wurden die verschiedenen Korrosionsarten entsprechend ihrer ersten objektiv erkennbaren makroskopischen Kennzeichen zusammengefasst.

Es wurde folgende Klassifizierung getroffen [71, 72]:

- Gleichmäßige Korrosion
- Vertiefungen
- Risse
- Andere Erscheinungsarten

Dabei wurde der Punkt „Andere Erscheinungsarten“ zusätzlich aufgenommen, da nicht alle Korrosionsarten eindeutig in die anderen drei Bereiche eingeteilt werden können. Darunter fällt unter anderem der Block der selektiven Korrosion, der jedoch erst in der zweiten Ebene der Abfrage ihren Platz hat, da der Begriff selektive Korrosion kein makroskopisches Kennzeichen ist. Weiterhin wurden in diesen Oberpunkt die Erosions-, die Kavitations-, die Filiform- und die Kontaktkorrosion aufgenommen.
Nach dieser Grundeinteilung, die in Abb. 47 graphisch dargestellt ist, wurden die einzelnen Korrosionsarten in weitere Punkte unterteilt. Es handelt sich dabei um die Bedingungen ihres Auftretens, die teilweise sehr charakteristisch sind wie zum Beispiel bei der Spalt- oder der Kontaktkorrosion, und dem genauen Aussehen der Schadenkennzeichen. Ein weiteres beispielhaftes Charakteristikum stellt das Auftreten, die Lage und die Zusammensetzung von Korrosionsprodukten dar. Entsprechend dieser Kriterien wurde die Untersuchung und Einteilung vorgenommen.

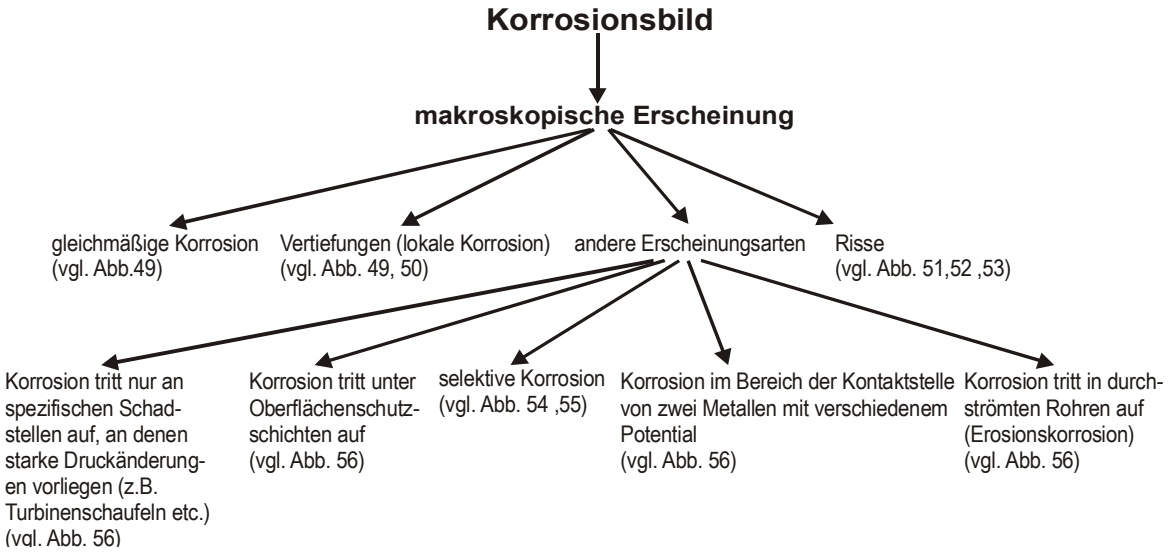


Abbildung 47: Grundeinteilung der Korrosionsarten

In den Abb. 48-56 werden die Korrosionsarten genauer ausgeführt.

Erklärung der Diagramme:
Links: Untersuchungsverfahren zur Feststellung des Kennzeichens
soft soft sign (vgl. Kap. 5.5.1.3.)
hard hard sign (vgl. Kap. 5.5.1.3.)
→ Untersuchungsreihenfolge

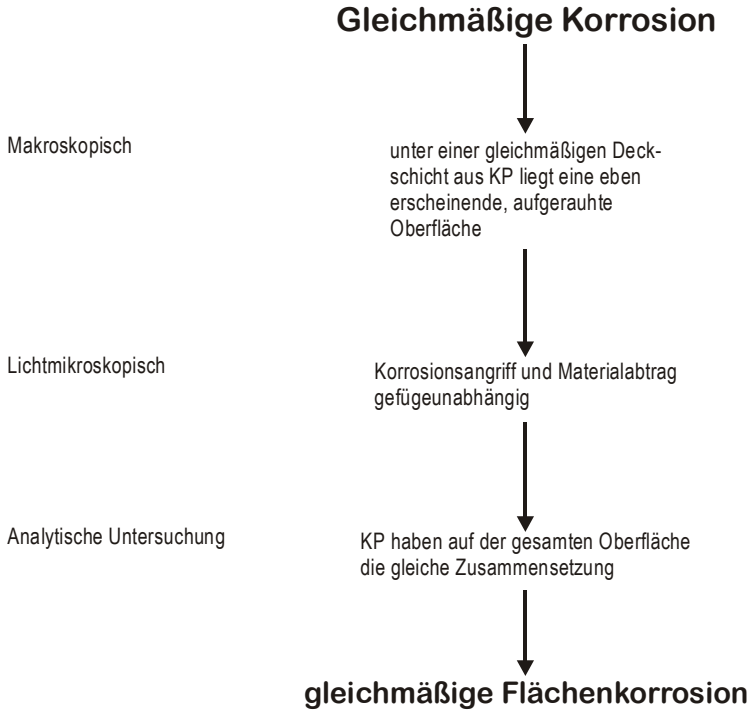


Abbildung 48: Gleichmäßige Korrosion

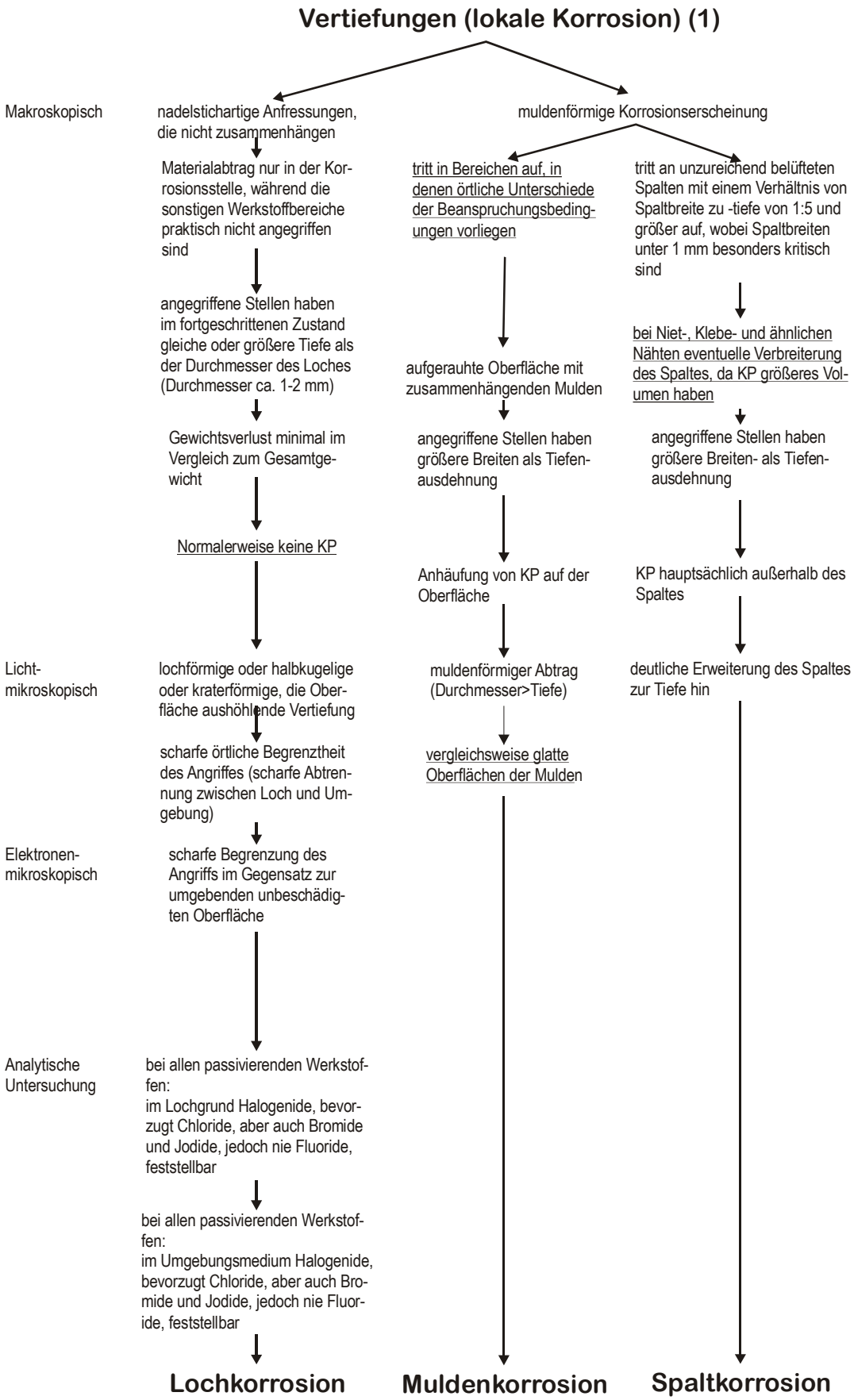


Abbildung 49: Vertiefungen (lokale Korrosion)

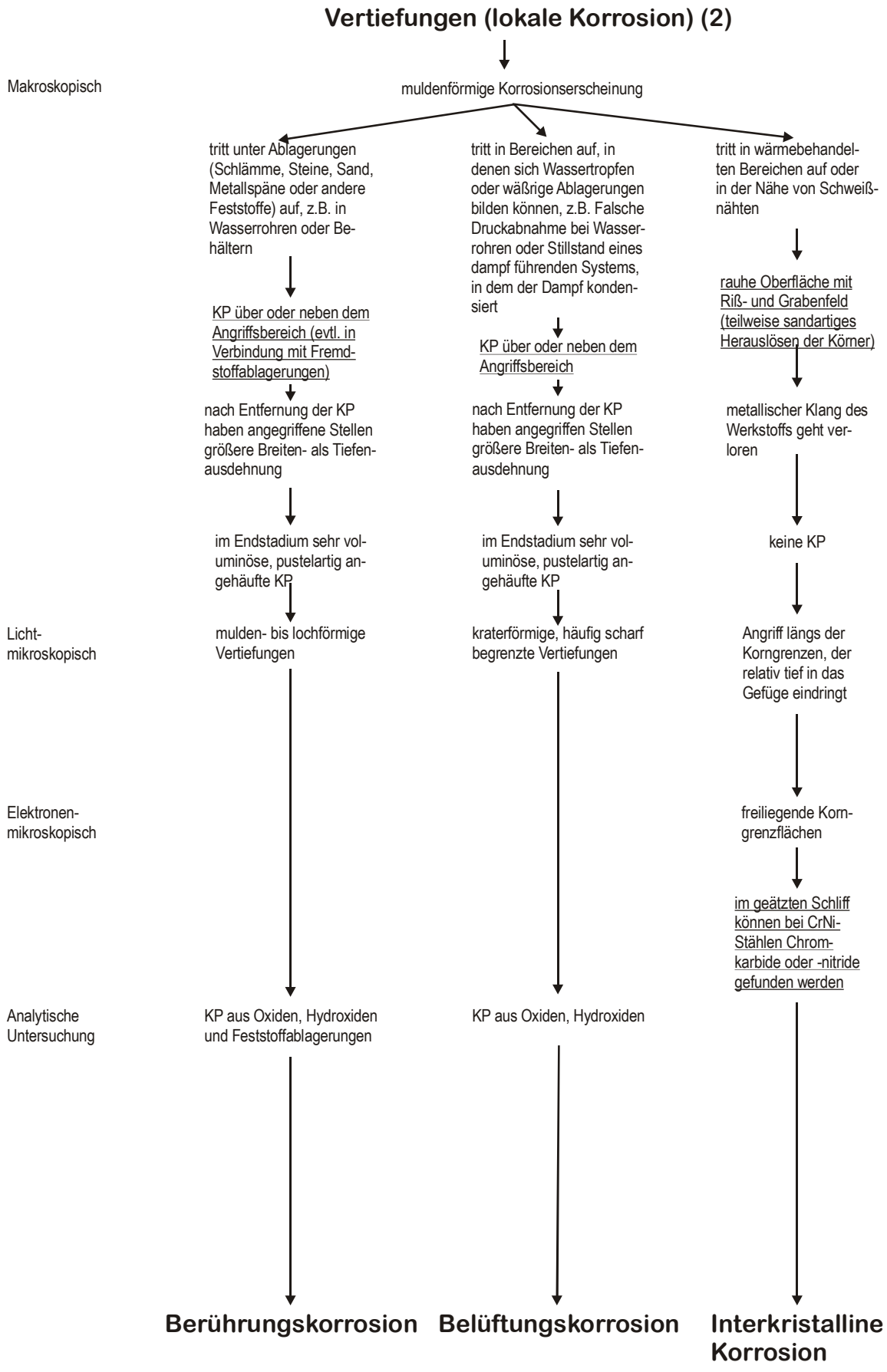


Abbildung 50: Vertiefungen (lokale Korrosion) (Fortsetzung)

Abbildung 51: Risse

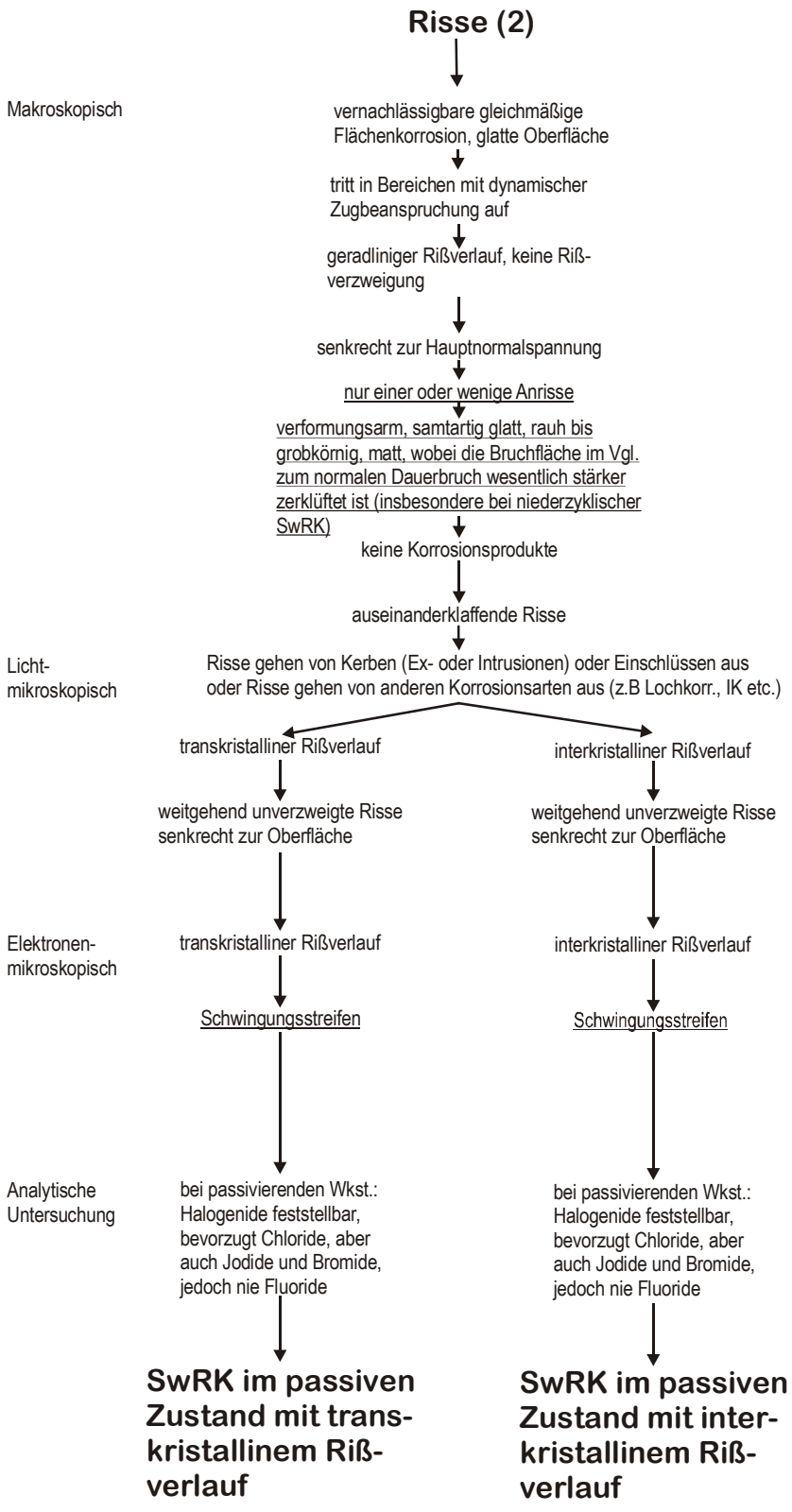


Abbildung 52: Risse (Fortsetzung 1)

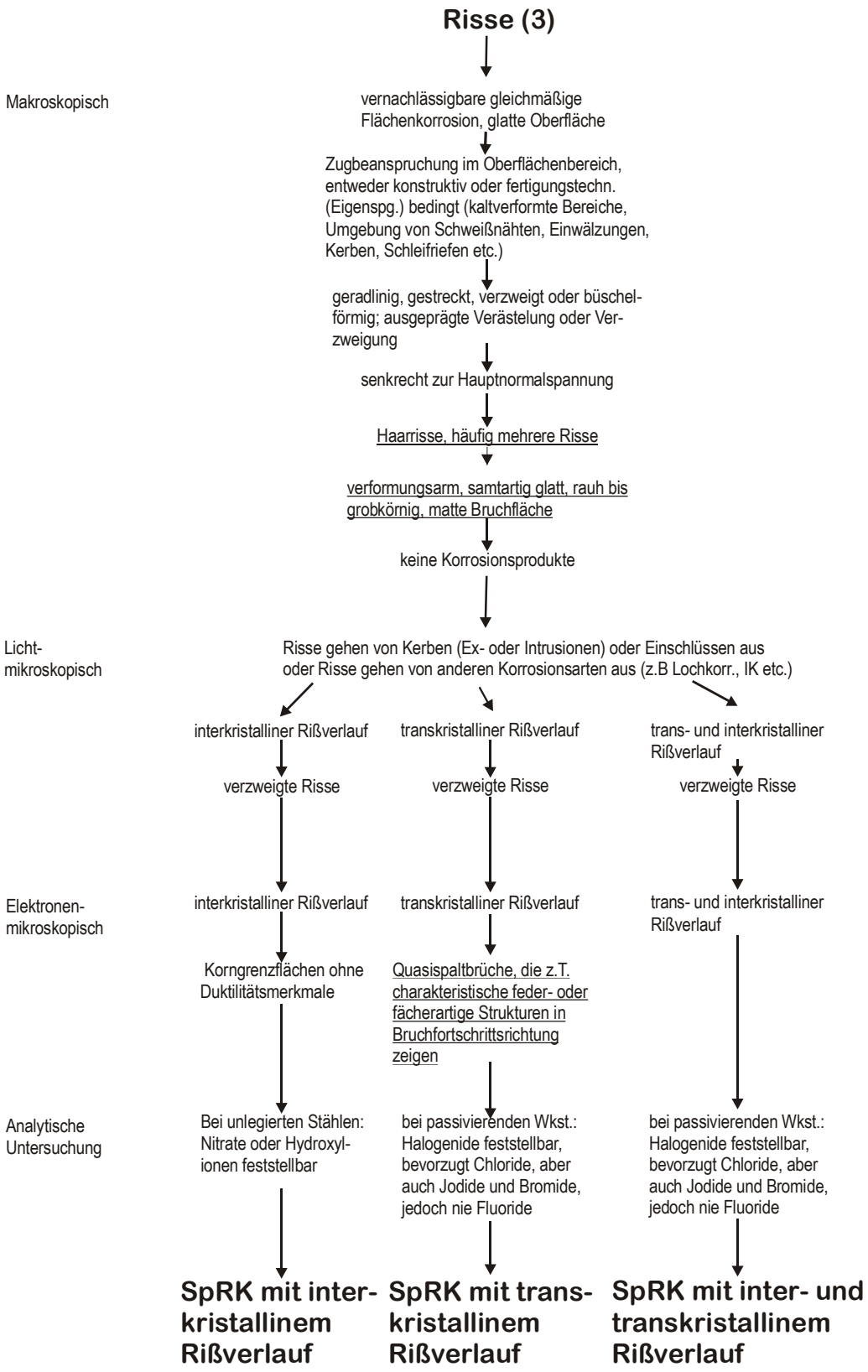


Abbildung 53: Risse (Fortsetzung 2)

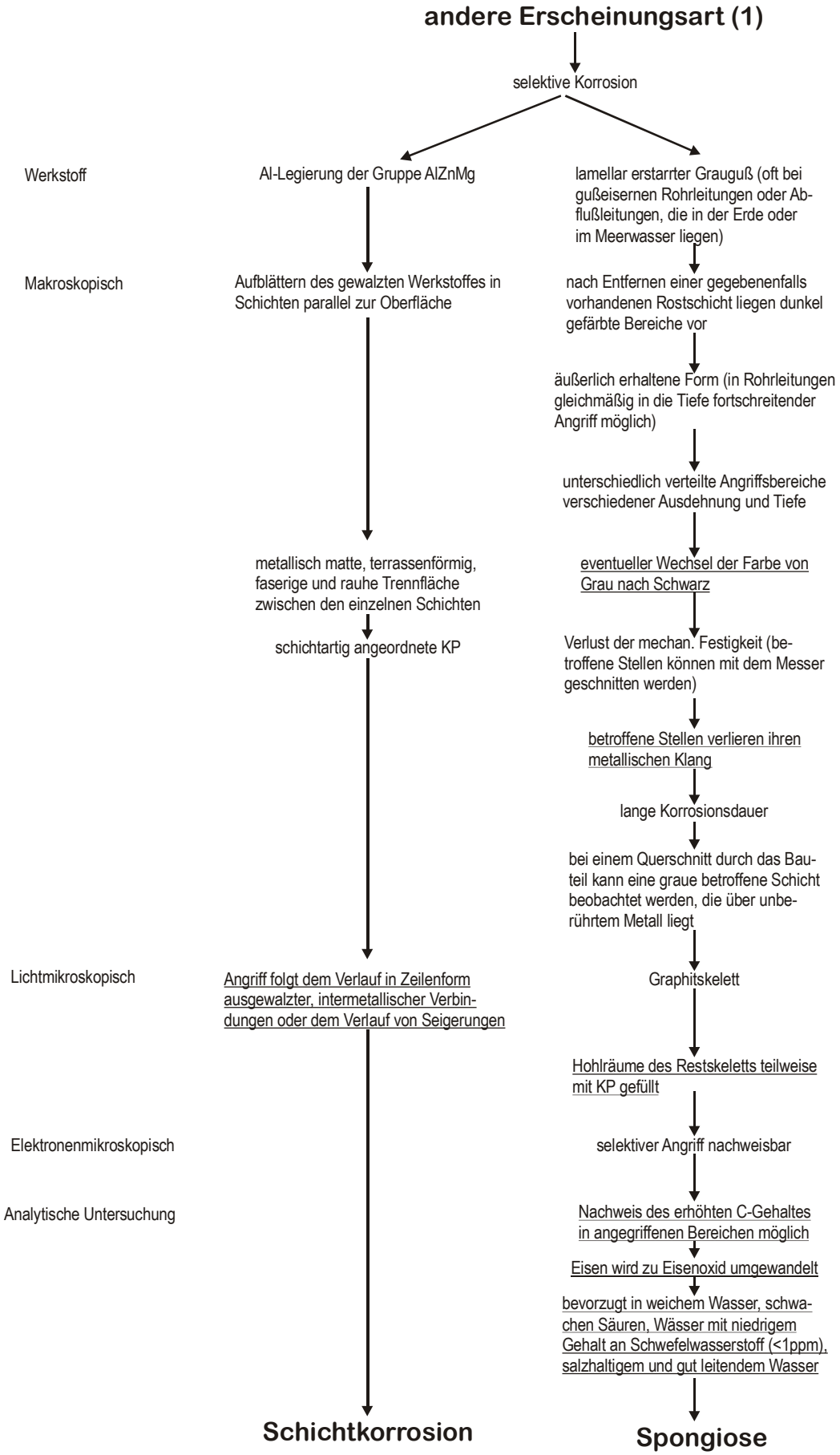


Abbildung 54: Andere Erscheinungsarten der Korrosion

Abbildung 55: Andere Erscheinungsarten der Korrosion (Fortsetzung 1)

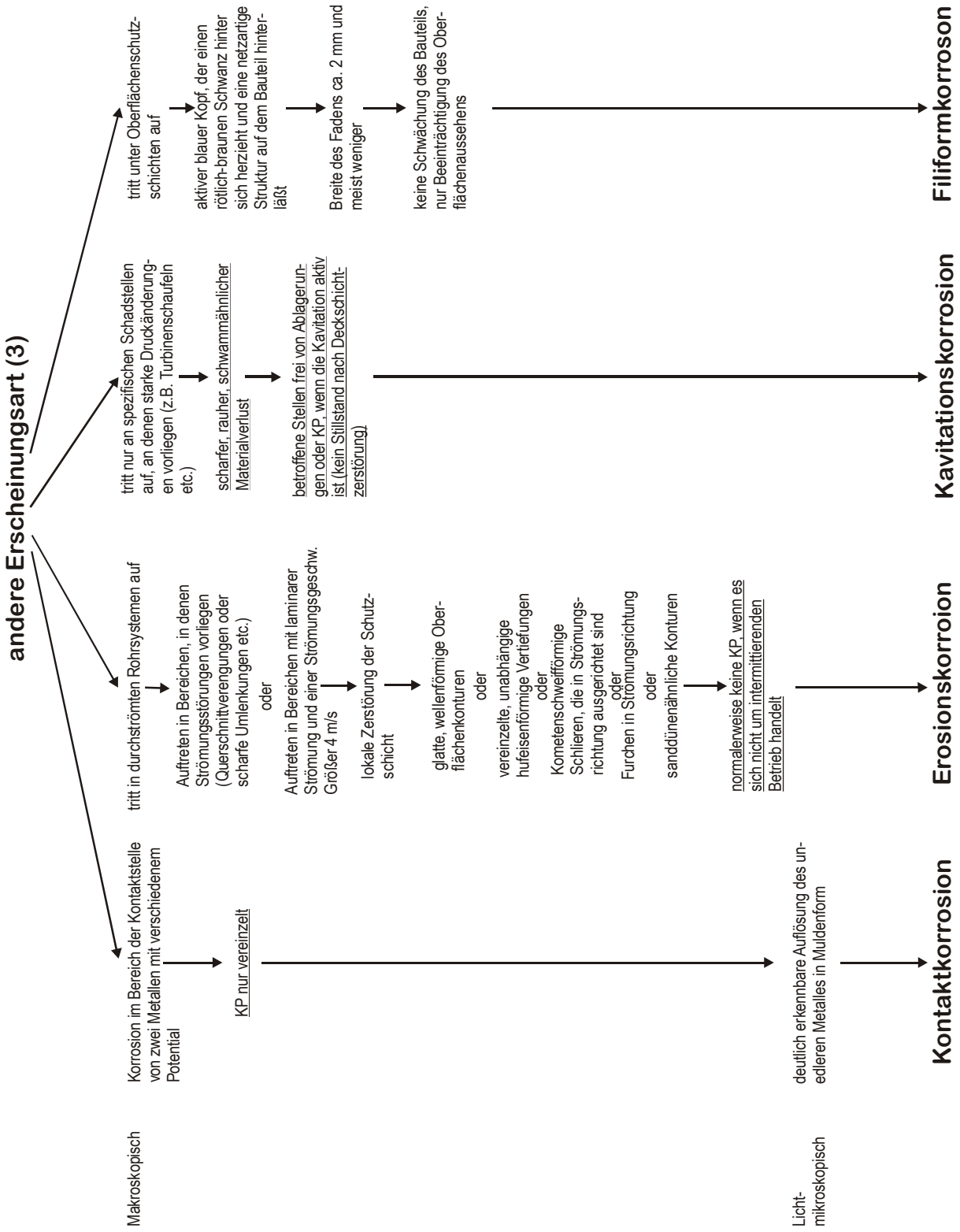


Abbildung 56: Andere Erscheinungsarten der Korrosion (Fortsetzung 2)

5.5.4. Korrosionsschadenanalyse anhand der Schadenmechanismen

Neben dem Erscheinungsbild eines Schadens (vgl. Kap. 5.5.3.) müssen zur Klärung eines Schadenfalles die Umgebungseinflüsse betrachtet werden. Das heißt, dass geklärt werden muss, ob ein bestimmter Mechanismus, der zu einem Schaden führt, durch die zum Zeitpunkt des Schadeneintrittes vorliegenden Umgebungsbedingungen ausgelöst wurde.
Deswegen wurde im Rahmen des zweiten Expertensystems eine Auflösung der einzelnen Mechanismen in die zur Schadenklärung notwendigen Bestandteile vorgenommen, die dann zu einem Gesamtsystem verbunden wurden, das es ermöglicht, anhand einer Vorwärtsverkettung zu einer Schadenart und –ursache zu gelangen.

Nach Schmitt-Thomas beruht die Korrosion im Endeffekt auf drei Grundelementen, die Korrosionserscheinungen hervorrufen können [76]. Dabei handelt es sich um das Kontaktelement, das aufgrund eines Potentialunterschiedes zwischen zwei sich berührenden Metallen entsteht, das Konzentrationselement, bei dem ein Potentialunterschied durch die unterschiedliche Konzentration eines Mediums ausgelöst wird, und das Temperaturelement, dessen Potentialunterschied durch verschiedene Temperaturen eines Mediums hervorgerufen wird. Eine Untermauerung dieser Aussagen liefert die Nernst'sche Gleichung, die nur vom Potential, der Konzentration und der Temperatur abhängig ist.

$$U=U_0+(RT)/(zF)*\ln(a_{Me2+}/a_{Me})$$ [76]

U_0=freies Korrosionspotential
R=allgemeine Gaskonstante
T=Temperatur des Mediums
z=Anzahl der Oxidationsstufe des Metalls
a_{Me2+}=Konzentration
a_{Me}=Konzentration

Aus diesen Zusammenhängen wird klar, dass der Grund für eine Korrosionserscheinung immer ein Potentialunterschied ist, weswegen zur Klärung der Schadenursache mit Hilfe einer Systematik alle Möglichkeiten gefunden werden mussten, die einen Unterschied im Potential hervorrufen können. Um dies vorzunehmen, mussten alle Einflussgrößen, die ein reales Korrosionssystem ausmachen, berücksichtigt werden.

Das Ziel war dabei, wie oben bereits angesprochen, nicht nur die Klärung der Schadenart, sondern auch der Schadenursache, was weder mit einem Werkstoff/Mediumsbeziehungssystem noch mit der Schadenbilderkennung möglich ist.
Um dieses Ziel zu erreichen, wurden konkrete Schäden aus Gutachten und Büchern rückwärts verfolgt. Die gefundenen Schadenursachemöglichkeiten wurden dann in bestimmte Kategorien eingeteilt, um eine sinnvolle systematische Bearbeitung zu ermöglichen.
Es wurde somit eine Systematik aufgestellt, die die Gedankengänge eines Experten simuliert. Diese Simulation ist nötig, um dem Anwender eine Vorgehensweise zu vermitteln und ihn zu einer Schadenursache zu lenken, da zusammenhanglose Aneinanderreihungen von Einfluss-

faktoren bereits ausreichend vorhanden, aber dem Anwender kaum nützlich sind [60, 62, 68], wenn er nicht bereits über ein fundiertes Wissen im Bereich der Korrosion verfügt.

Im Gespräch mit Schadengutachtern wurde dabei folgende Vorgehensweise festgestellt, die durch das System modelliert wird [72, 73]:

> Anhand einiger Fragen, die für das Fachgebiet der Korrosion spezifisch, aber noch nicht auf eine bestimmte Schadenart oder –ursache gerichtet sind, wird die Untersuchung in eine geeignete Richtung gelenkt. Dadurch findet ein Ausschluss verschiedener Möglichkeiten statt, womit die potentielle Schadenart eingegrenzt wird. Nachdem eine oder mehrere ähnliche Schadenarten als Möglichkeiten festgestellt wurden, wird anhand von Fragen, die sich jetzt speziell auf die ermittelten Hypothesen beziehen, die Art und auch die Korrosionsursache ermittelt.

Für die Korrosion spezifische Fragen sind zum Beispiel, ob eine überlagerte mechanische Belastung vorlag oder ob das Bauteil eine Deckschicht hatte. Eine auf die Korrosionsart bezogene Frage ist beispielsweise bei der Erosionskorrosion, wie hoch die Strömungsgeschwindigkeit war.
Auf diese Weise ist es möglich, dass in jedem Teilschritt nur eine überschaubare Anzahl an Parametern berücksichtigt werden muss und schon sehr früh eine Aussage getroffen werden kann, welche Parameter weiterhin beobachtet werden müssen und welche ausgeschlossen werden können.

Obwohl eine Systematik aufgestellt werden sollte, die völlig unabhängig von Restriktionen wie einem bestimmten Anlagentyp, kontruktiven Besonderheiten oder Werkstoffen sein sollte, konnte eine Unabhängigkeit von den Werkstoffen nicht erreicht werden, da der Werkstoff und sein spezifisches Verhalten derart übergeordnet sind, dass für jeden Werkstoff ein eigens angepasstes Modell erstellt werden muss. Ein Beispiel dafür ist der sehr große eindeutig nachgewiesene Einfluss von Chloriden im Medium bei nichtrostenden Stählen sowie die Bildungsbedingungen ihrer Passivschichten [138], was bei un-/niedriglegierten Stählen kaum eine Rolle spielt. Deswegen wurden in dieser Arbeit beispielhaft Modelle für un-/niedriglegierten Stahl als Vertreter eines nichtpassivierenden Werkstoffes und für nichtrostenden Stahl als Vertreter eines passivierenden Werkstoffes aufgestellt. Dabei wird die gleiche Grundstruktur der Systematik verwendet, die jedoch entsprechend der einzelnen Gewichtungen angepasst wurde.

Bis zum Einsatz einer Maschine an ihrem Endstandort, geht sie durch viele verschiedene Hände. Dies beginnt mit der Herstellung eines Werkstoffes und seiner Bearbeitung, bis er das Werk als Halbzeug verlassen kann. Danach wird er vom Verarbeiter übernommen, der ihm die für die Einzelteile einer Maschine benötigten Geometrien verleiht und schließlich entsprechende Wärme- und Oberflächenbehandlungen vornimmt. Als nächstes werden die Bauteile mit Hilfe verschiedener Fügeverfahren wie Schrauben, Schweißen oder Nieten zusammen-

montiert. Hierauf muss die fertige Maschine noch den Transport- und den Aufstellvorgang über sich ergehen lassen. Letztendlich kann dann die Produktion aufgenommen werden.
Bei jedem dieser Schritte kann es zu Fehlern kommen, die schließlich bei der Nutzung zu einem Schaden führen können. Wie bereits in der Einleitung erwähnt, können dabei erhebliche Kosten entstehen, weswegen der Betreiber und die Hersteller bzw. die betroffenen Versicherungen daran interessiert sind zu klären, wer die finanziellen Lasten zu tragen hat. Beispielsweise kann es beim Einsatz von nichtrostendem Stahl sehr schnell zu Korrosionserscheinungen kommen, wenn bei der Bearbeitung nicht darauf geachtet wird, dass sich eine gleichmäßige Passivschicht ausbilden kann. In diesem Falle handelt es sich also eindeutig um einen Fehler des Lieferanten. In einem anderen Beispiel kam es trotz des Einsatzes von hochwertigem nichtrostenden Stahl beim Bau eines Hochbehälters einer Trinkwasserversorgungsanlage bereits vor Inbetriebnahme zu erheblichen Korrosionserscheinungen. Nach einer eingehenden Untersuchung wurde festgestellt, dass der Schaden auf unsachgemäße Reinigung an der Baustelle vor der Übergabe an den Betreiber zurückzuführen war. Somit hatte die Reinigungsfirma die Kosten zu tragen [139].

Unter Berücksichtigung dieser Bereiche, in denen Fehler auftreten können, die zu einem Schaden führen, wurde eine Systematik aufgestellt, die geschlossen ist und nicht nur die einzelnen Korrosionsmechanismen zusammenhanglos aneinander reiht.
Es wurden folgende drei Bereiche, in denen Fehler auftreten können, definiert:

- Einsatz: hier werden alle Einflüsse nach der Fertigstellung der Anlage im täglichen Einsatz zusammengefasst
- Bearbeitung: dieser Punkt betrifft alle Schritte, die sich mit der Herstellung oder der Reparatur der Anlage befassen, also alle Vorgänge, die an der Maschine durchgeführt werden
- Lieferung: darunter fallen sämtliche Maßnahmen, die mit dem Transport und der dafür nötigen Konservierung der Anlage in Verbindung stehen

Der Vorteil dieser Einteilung ist, dass sie losgelöst von bestimmten Anlagen wie Wasserleitungen oder Turbinen verwendet werden kann. Außerdem können auch problemlos konstruktive Fehler subsumiert werden.
In jedem der drei Bereiche können mechanische Spannungen auf Teile der Anlage wirken, die bei zusätzlicher Einwirkung eines Mediums zu entsprechenden Korrosionsarten führen können. Da sich dabei nur die Ursache der Spannungen ändert, während der Schadenmechanismus und das –aussehen gleich bleiben, wurde ein Zentralbereich angelegt, der sich mit mechanischen Belastungen beschäftigt.
Ein weiterer derartiger Zusatzbereich wurde für den vorliegenden Oberflächenzustand eingerichtet, da dieser ebenfalls eine übergeordnete Rolle hat. So ist es bei un-/niedriglegierten

Stählen von zentraler Bedeutung, ob eine Deckschicht vorliegt oder nicht, weswegen es sinnvoll ist, dies vor einer weiteren Untersuchung zu klären.
Diese beiden Zentralbereiche werden aufgrund ihrer übergreifenden Bedeutung vor den anderen Bereichen abgefragt, wobei entsprechend den in den Lehrbüchern enthaltenen Unterteilungen (vgl. Kap. 2.3.) mit der Frage begonnen wird, ob eine mechanische Zusatzbelastung vorliegt oder nicht. Diese Frage hat sich als guter Ausgangspunkt herausgestellt, von dem aus eine weitere Verzweigung in die verschiedenen Bereiche vorgenommen werden kann.
Diese Einteilung wurde gewählt, um möglichst schnell bestimmte Bereiche, in denen die Ursachen für Fehler begründet sein können, auszuschließen und somit den Aufwand der Fehlersuche zu minimieren.

Es ergibt sich damit für un-/niedriglegierte Stähle folgende Gliederung, in die die einzelnen Korrosionsmechanismen eingeteilt wurden:

- Mechanische Belastung
- Oberflächenzustand
- Einsatz
- Bearbeitung
- Lieferung

Die genaue Ausführung zeigen die Abb. 59-75 in Kap. 5.5.4.1. Dabei wurde das bereits in Kap. 3 eingeteilte Wissen so zergliedert, dass man anhand einzelner Fragen zu einem Ergebnis gelangen kann. Den Ablauf einer Sitzung und damit den Zusammenhang der einzelnen Bereiche verdeutlicht Abb. 57.

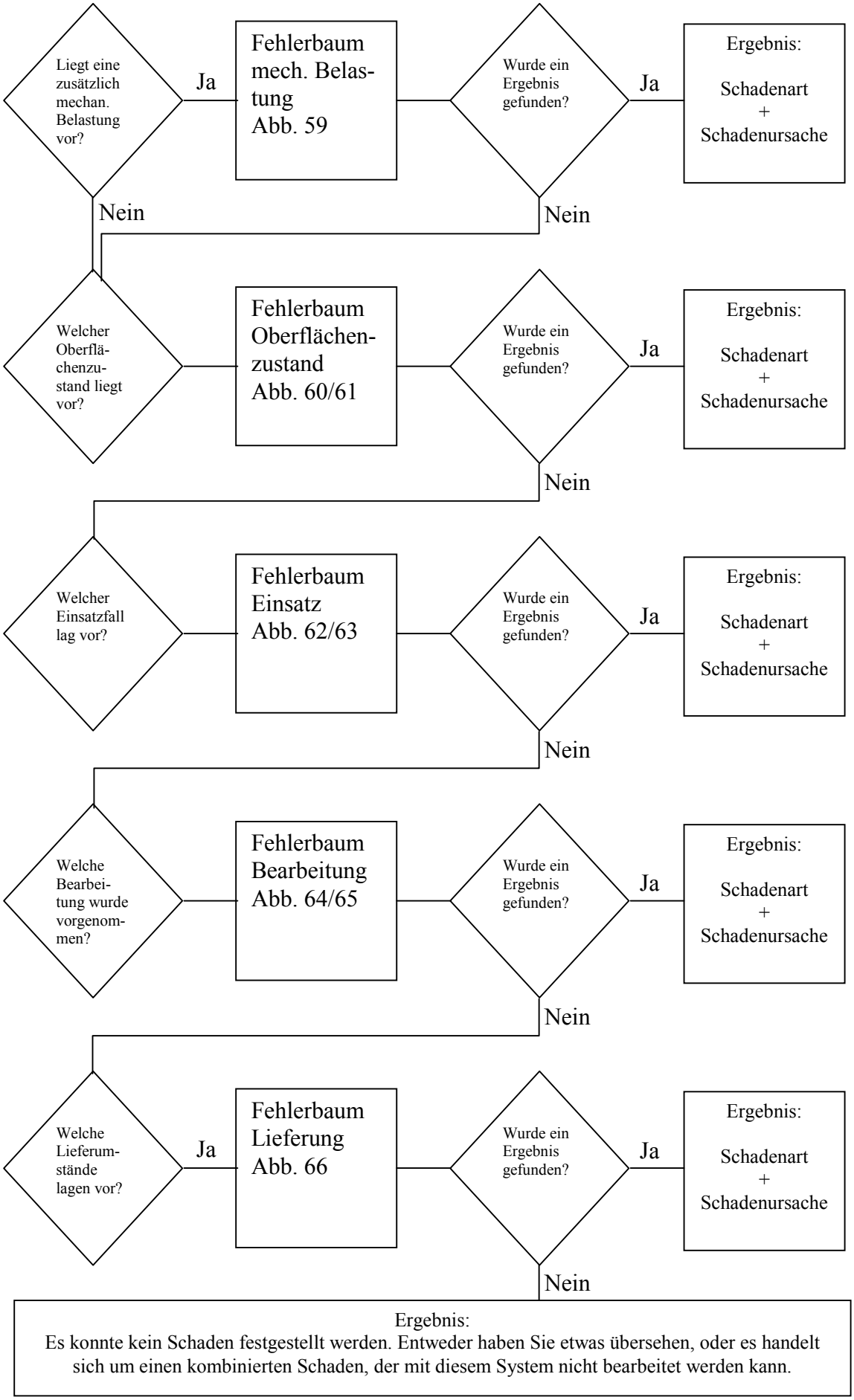


Abbildung 57: Ablauf einer Sitzung bei un-/niedriglegierten Stählen

Erläuterungen zu nichtrostenden Stählen

Diese Vorgehensweise wurde auf einen passivierenden Werkstoff in Form der nichtrostenden Stähle übertragen.
Dazu war eine Anpassung des Modells notwendig, da sich das Korrosionsverhalten dieser Werkstoffe im Vergleich zu un-/niedriglegierten Stählen teilweise unterscheidet. So haben Deckschichten bei nichtrostenden Stählen eine geringere Bedeutung, wogegen die Beständigkeit dieser Stähle extrem von der im Medium vorliegenden Halogenidkonzentration abhängt, die aufgrund ihrer Sonderstellung nicht nur qualitativ, sondern quantitativ im System berücksichtigt wurde.
Dabei wurden jedoch nur die Chloride explizit aufgenommen, da sie aufgrund ihres häufigen Vorkommens den größten Schaden anrichten. Bromide und Jodide wurden außer acht gelassen, da sie viel seltener auftreten und eine weitaus schwächere Wirkung zeigen, so dass die benötigte Schädigungskonzentrationen bedeutend höher sein muss, als bei Chloridangriff [140]. Im Gegensatz dazu wurden die Chloride bei un-/niedriglegierten Stählen nicht berücksichtigt, da sie dort langfristig keinen Einfluss auf die Abtragsrate haben [141].
Als Grenzwert, ab dem mit Korrosion gerechnet werden muss, wenn kein molybdänhaltiger Stahl verwendet wird, wurde bei Anwesenheit von Chloriden eine Konzentration von 200 mg/l verwendet. Dieser Wert wurde aus der DIN 50930 Teil 4 übernommen [58], da es sich dabei um einen Erfahrungswert handelt, der von Experten und der Fachliteratur bestätigt wurde.
Als Molybdängehalt, der nichtrostende Stähle gegen eine zu hohe Chloridkonzentration beständiger macht, wurde der Wert 2,3% genommen (vgl. Kap. 3.).

Eine weitere Quantifizierung fand im Bereich der Strömungsgeschwindigkeit statt, da sie in Verbindung mit dem Chloridgehalt des Mediums und dem Molybdängehalt des Werkstoffs einen sehr großen Einfluss auf die Loch- oder Chloridkorrosion, wie sie aufgrund der herausragenden Rolle der Chloride auch genannt wird, hat. Die Lochkorrosion tritt nur auf, wenn der Molybdängehalt kleiner als 2,3% ist, die Chloridkonzentrationen mehr als 200 mg/l beträgt und eine stagnierende bis mittlere Strömungsgeschwindigkeit vorliegt. Dies liegt daran, dass mit zunehmender Geschwindigkeit die Verweildauer der Halogenide auf der Oberfläche zu kurz ist, um die Passivschicht zu durchdringen [142]. Die Grenzgeschwindigkeiten wurden bei 0,5 m/s, unterhalb der aufgrund einer ausreichenden Inkubationszeit sicher mit Lochkorrosion gerechnet werden muss, und bei 2,5 m/s gelegt, über der mit großer Sicherheit keine Chloridkorrosion mehr auftritt (vgl. Kap. 3.). Im Zwischenbereich wurde lediglich eine erhöhte Wahrscheinlichkeit von Lochkorrosion festgestellt.
Unter Berücksichtigung dieser Zusammenhänge wurden die Bereiche Einsatz, Bearbeitung und Lieferung geändert.
Außerdem wurde im Rahmen der Bearbeitung die Interkristalline Korrosion berücksichtigt, die bevorzugt bei nichtrostenden Stählen auftritt und davon abhängig ist, ob entsprechende Gegenmaßnahmen zu ihrer Vermeidung vorgenommen wurden.

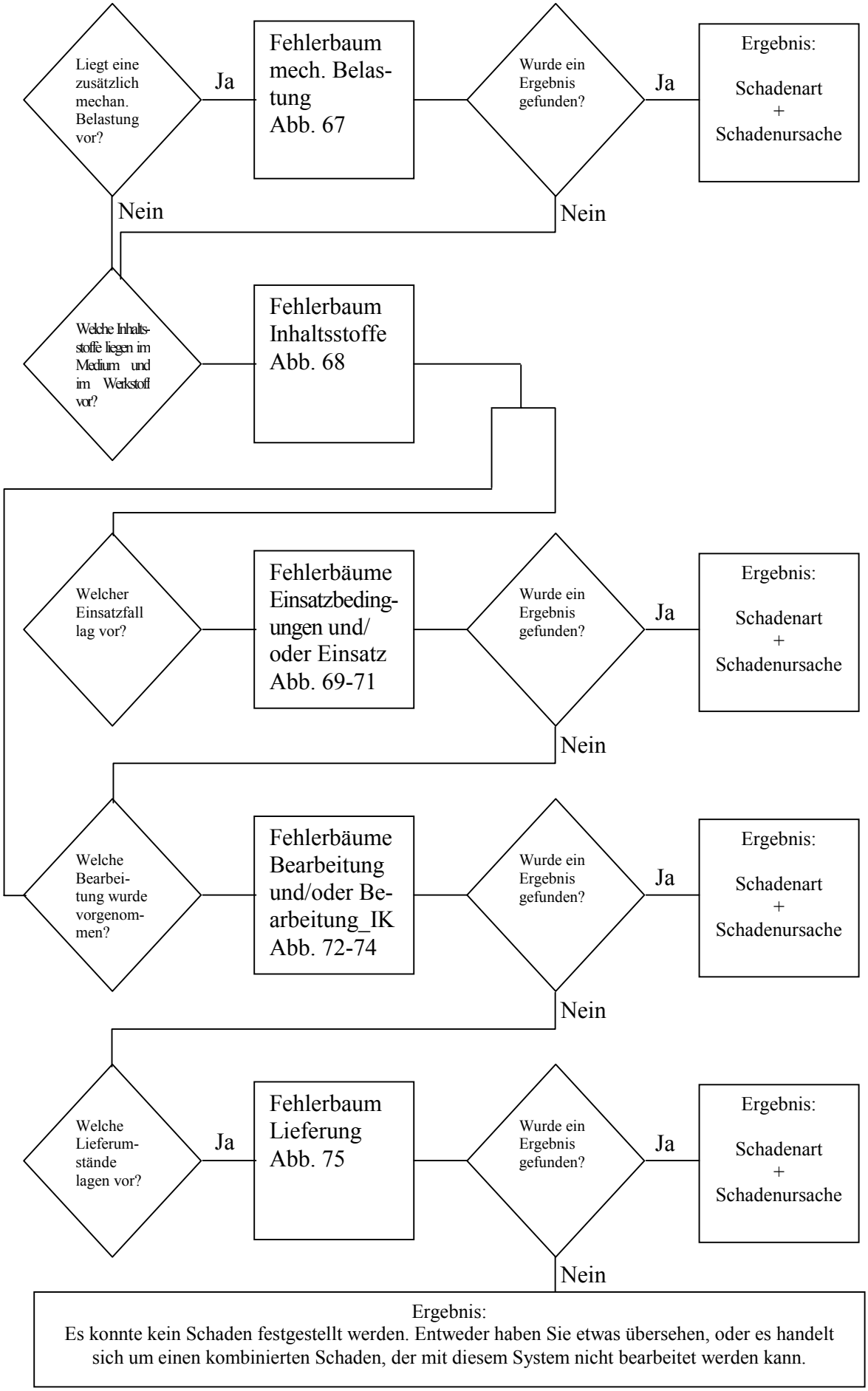


Abbildung 58: Ablaufplan für nichtrostenden Stahl

Diese Änderungen und Ergänzungen wurden in den Relevanzbaumdarstellungen berücksichtigt, weswegen aus Gründen der Übersichtlichkeit entsprechende neue Blöcke aufgenommen wurden. Den genauen Sitzungsablauf für nichtrostende Stähle zeigt Abb. 58. Diese Aufnahme weiterer Komplexe dient einer Erhöhung der Modularität des Systems, die sowohl die Übersichtlichkeit erhöht, als auch die Erweiterung erleichtert. So können in den Komplex Inhaltsstoffe in weiteren Arbeiten problemlos die Einflüsse von anderen Mediums- und Werkstoffinhaltsstoffen eingearbeitet werden.

5.5.4.1. Korrosionsablaufpläne für un-/niedriglegierten Stahl

Diese Systematik wurde, um sie besser strukturieren zu können und dem Praktiker schneller zugänglich zu machen, in Form eines Ablaufplanes aufgebaut.
Um eine größere Übersichtlichkeit zu erhalten, wurden die einzelnen Frageteile möglichst kurz und prägnant gehalten. Außerdem wurde auf eine Beschriftung der Wege mit Ja oder Nein im Falle einer Entscheidung verzichtet. Stattdessen wurde eine Verbindung durch Pfeile gestaltet, wobei ein durchgezogener Pfeil Ja bedeutet, während ein gestrichelter Pfeil für Nein steht.
In den Ablaufplänen wurde im Sinne der Übersichtlichkeit darauf verzichtet, das gesamte Metawissen, das die Rechnergestützte Schadenanalyse enthält, darzustellen. Dies bedeutet aber keine Einschränkung der Papierform, da es sich dabei nur um Rücksprunganweisungen handelt, wenn sich ein Weg als nicht zutreffend erwiesen hat.
Wenn innerhalb eines Hauptbereiches keine Ursache gefunden werden kann, erfolgt eine Verzweigung zum nächsten Hauptkomplex, der unter Berücksichtigung der bisherigen Eingaben als nächstes bearbeitet werden soll.

Erklärung zu den verwendeten Schriften und Symbolen:

Mechanische Belastung : Bezeichnung des Hauptkomplexes

Oberflächenzustand : Bezeichnung des Hauptkomplexes, zu dem gesprungen werden soll

Strömungsbelastung : normale Frage, die beantwortet werden muss

Kavitationskorrosion : Ergebnis der Befragung

——→ : Antwort auf die gestellte Frage ist *Ja*

– – – –→ : Antwort auf die gestellte Frage ist *Nein*

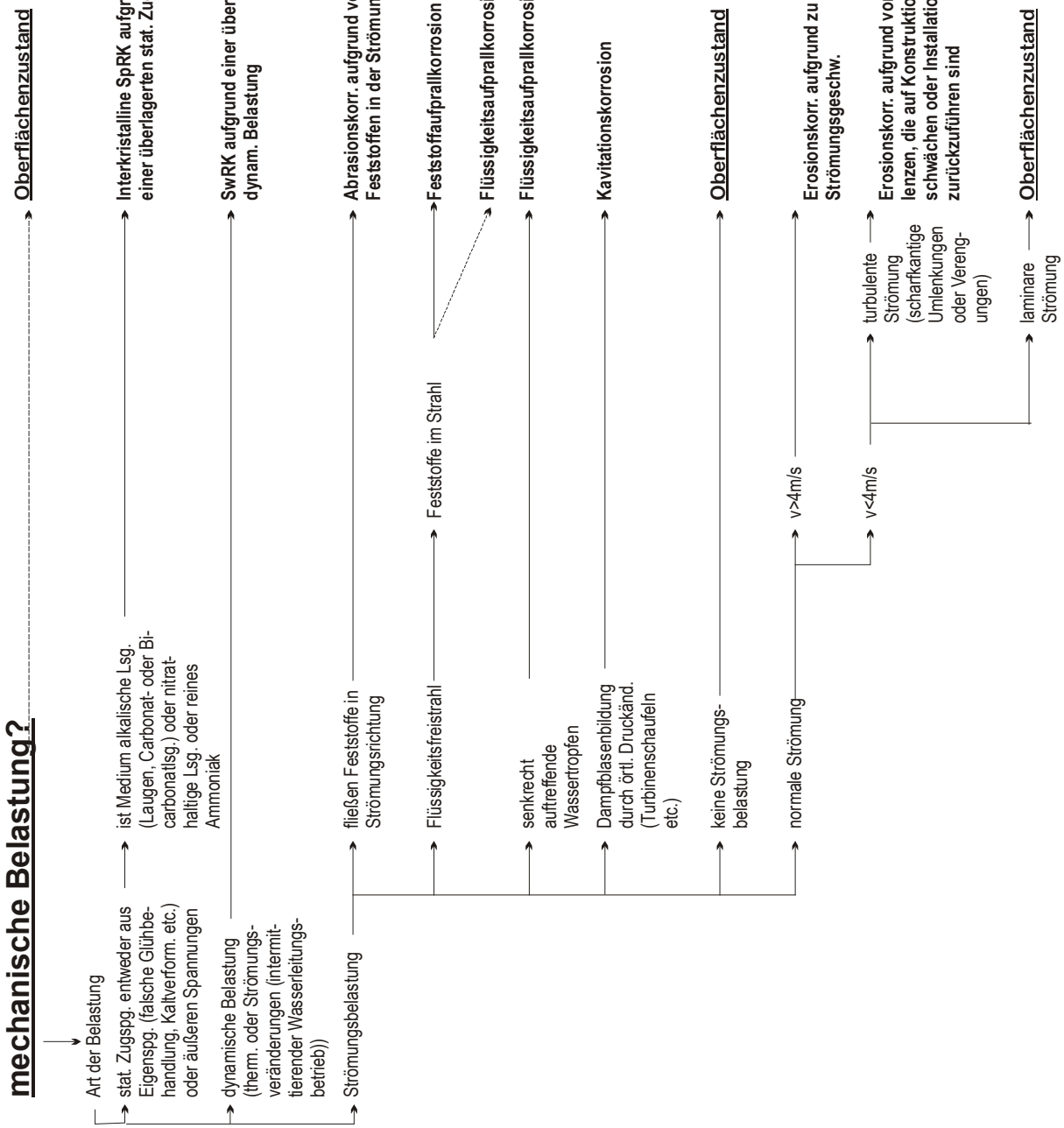


Abbildung 59: Mechanische Einflüsse bei un-/niedriglegierten Stählen

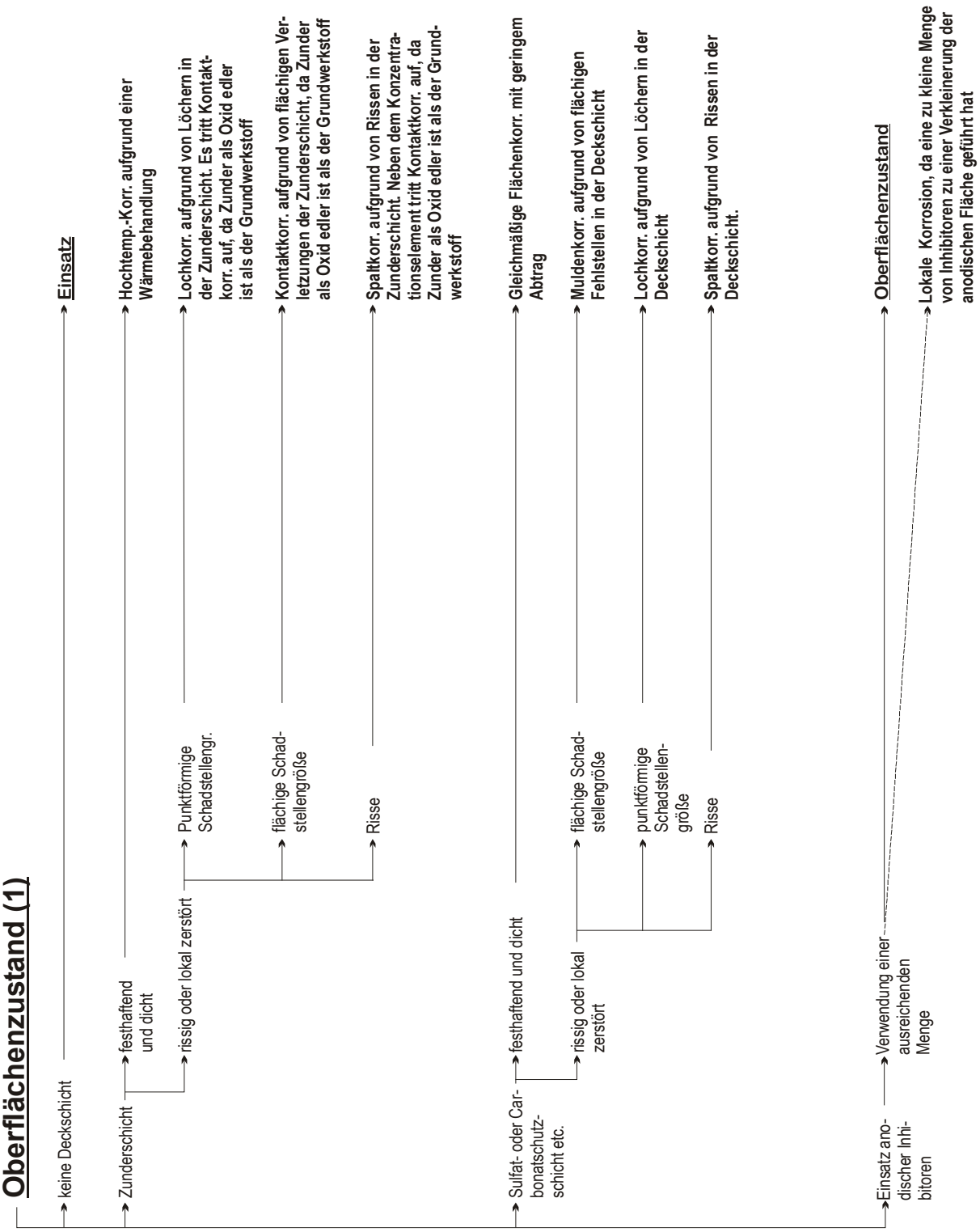


Abbildung 60: Einfluss des Oberflächenzustandes bei un-/niedriglegierten Stählen

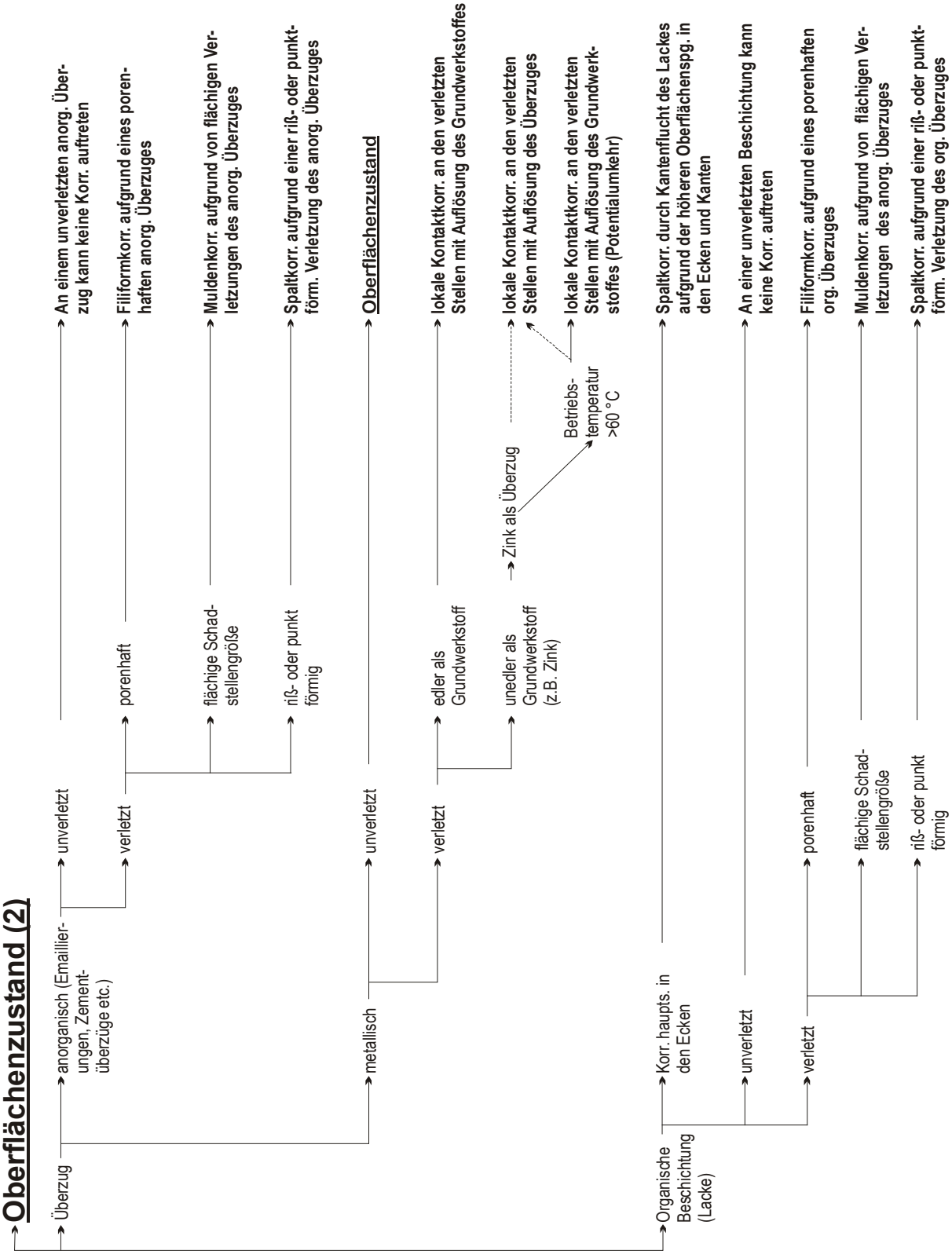


Abbildung 61: Einfluss des Oberflächenzustandes bei un-/niedriglegierten Stählen (Forsetzung)

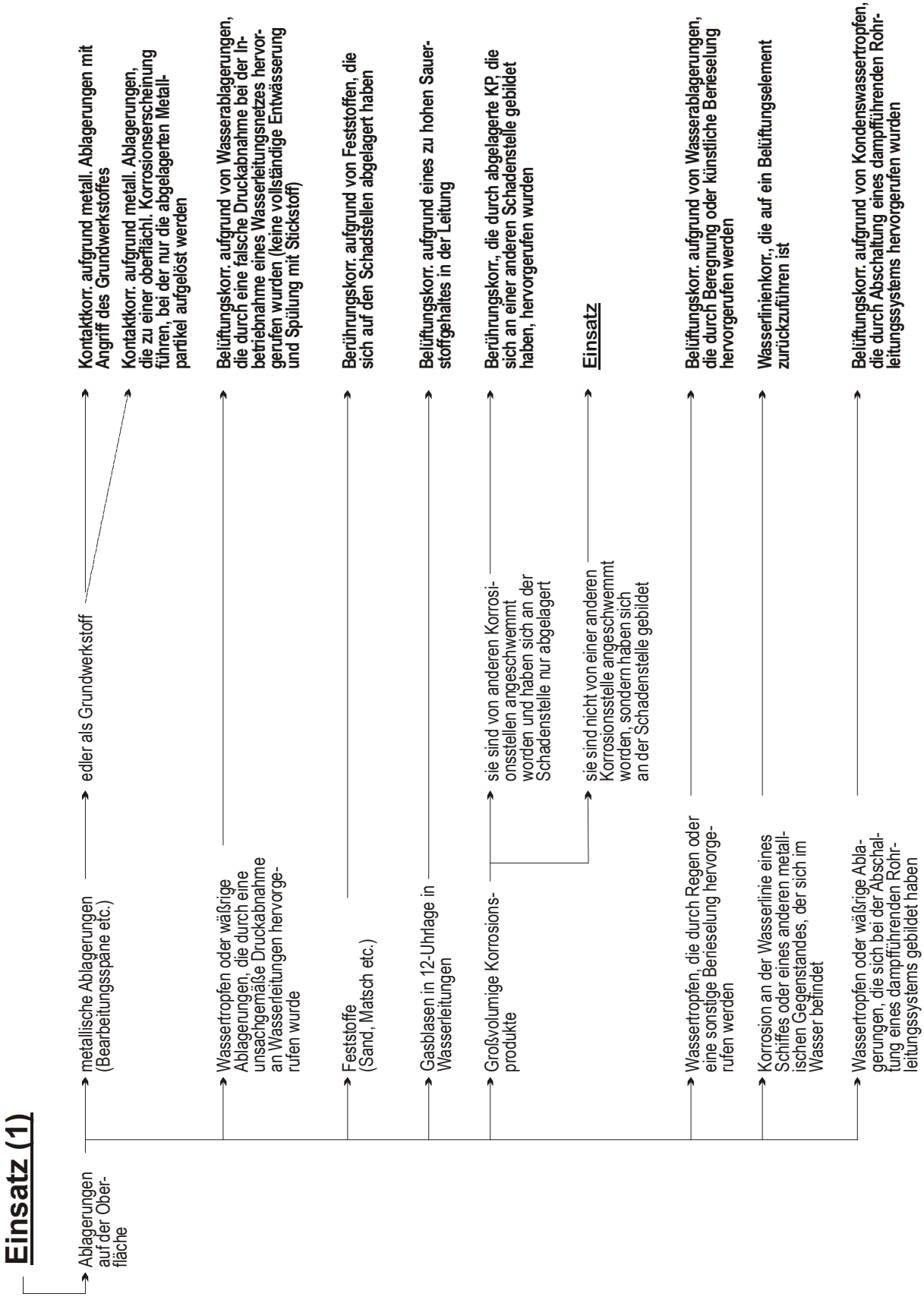


Abbildung 62: Einfluss der Einsatzbedingungen bei un-/niedriglegierten Stählen

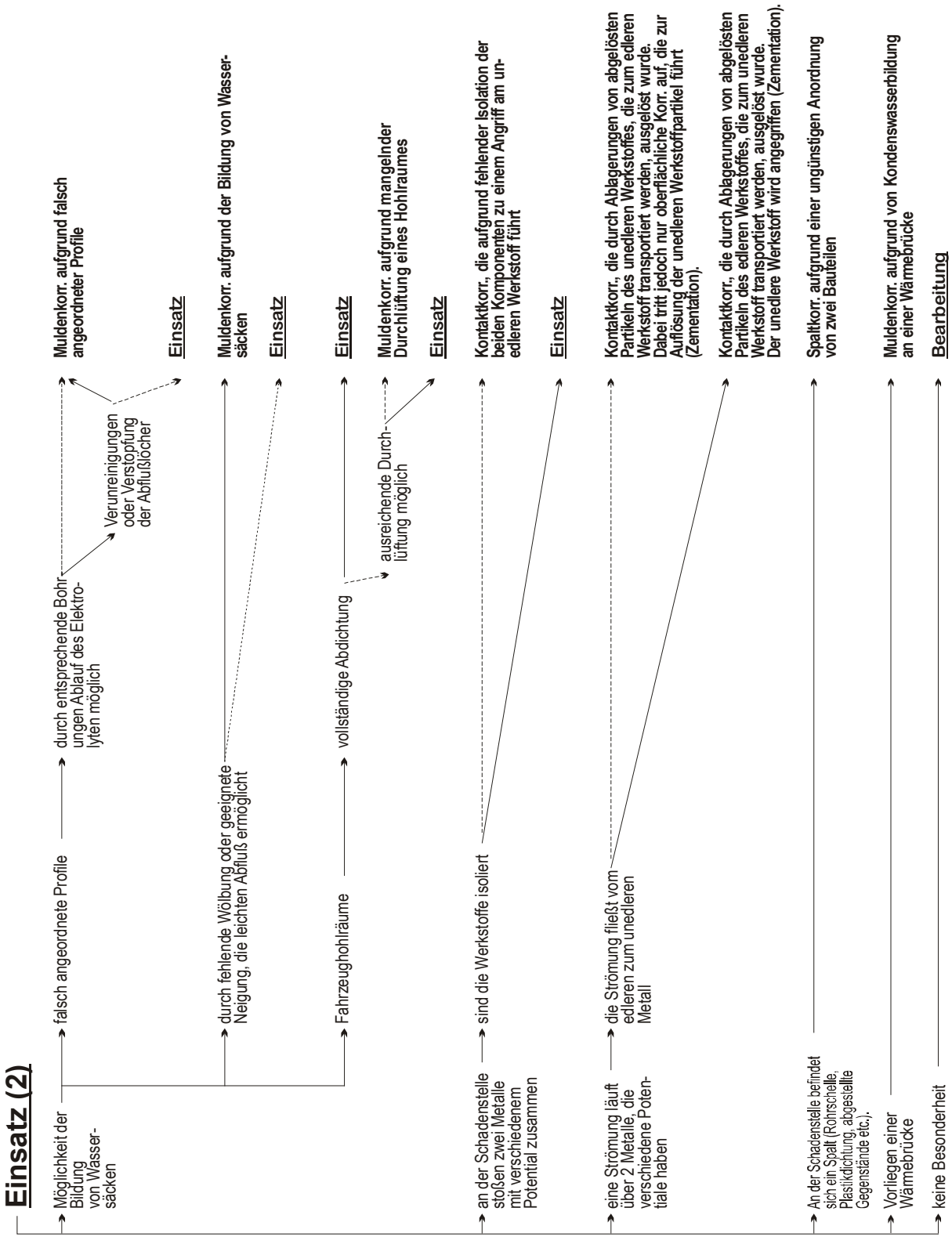


Abbildung 63: Einfluss der Einsatzbedingungen bei un-/niedriglegierten Stählen (Fortsetzung)

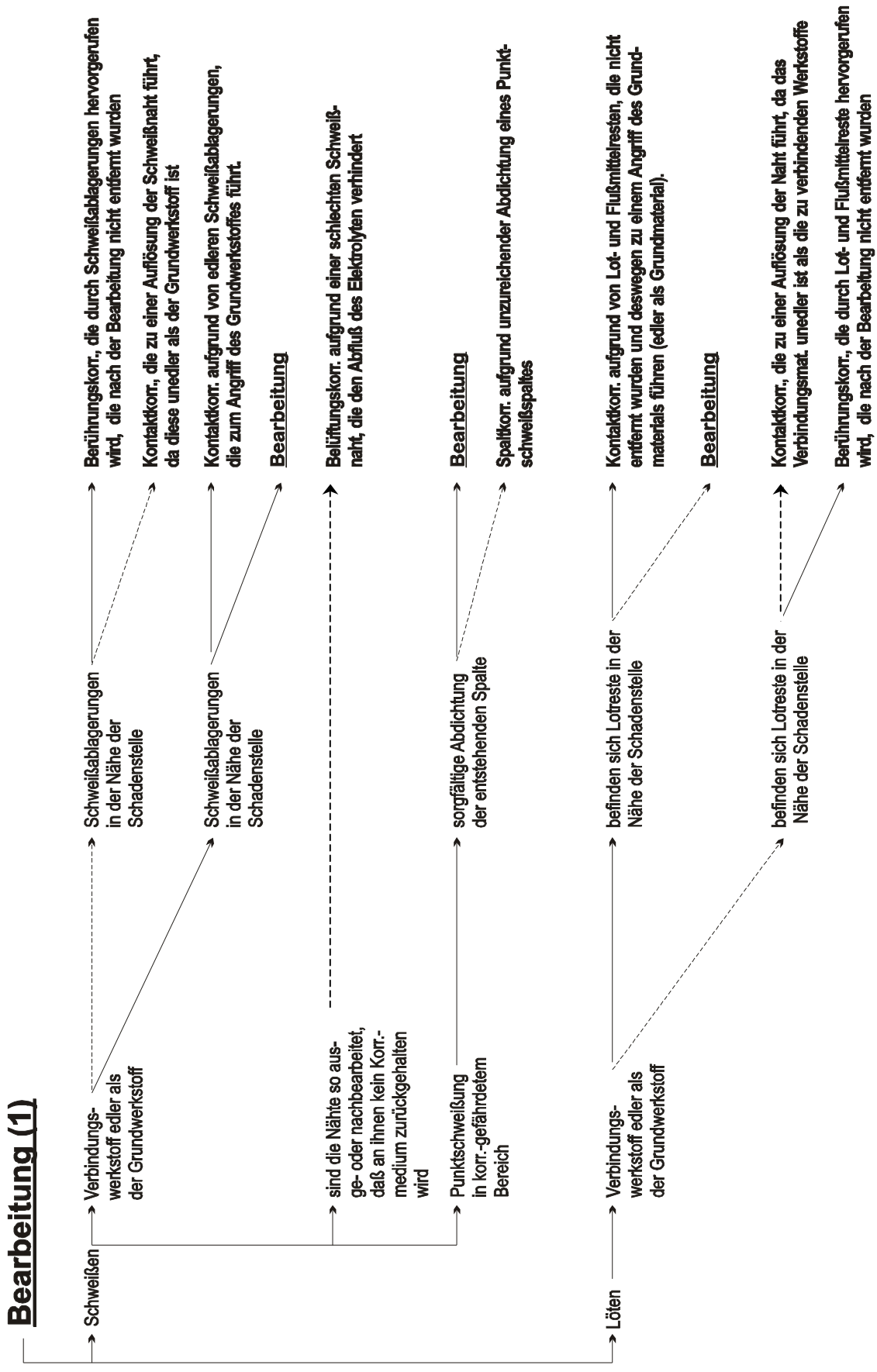


Abbildung 64: Einfluss der Bearbeitung bei un-/niedriglegierten Stählen

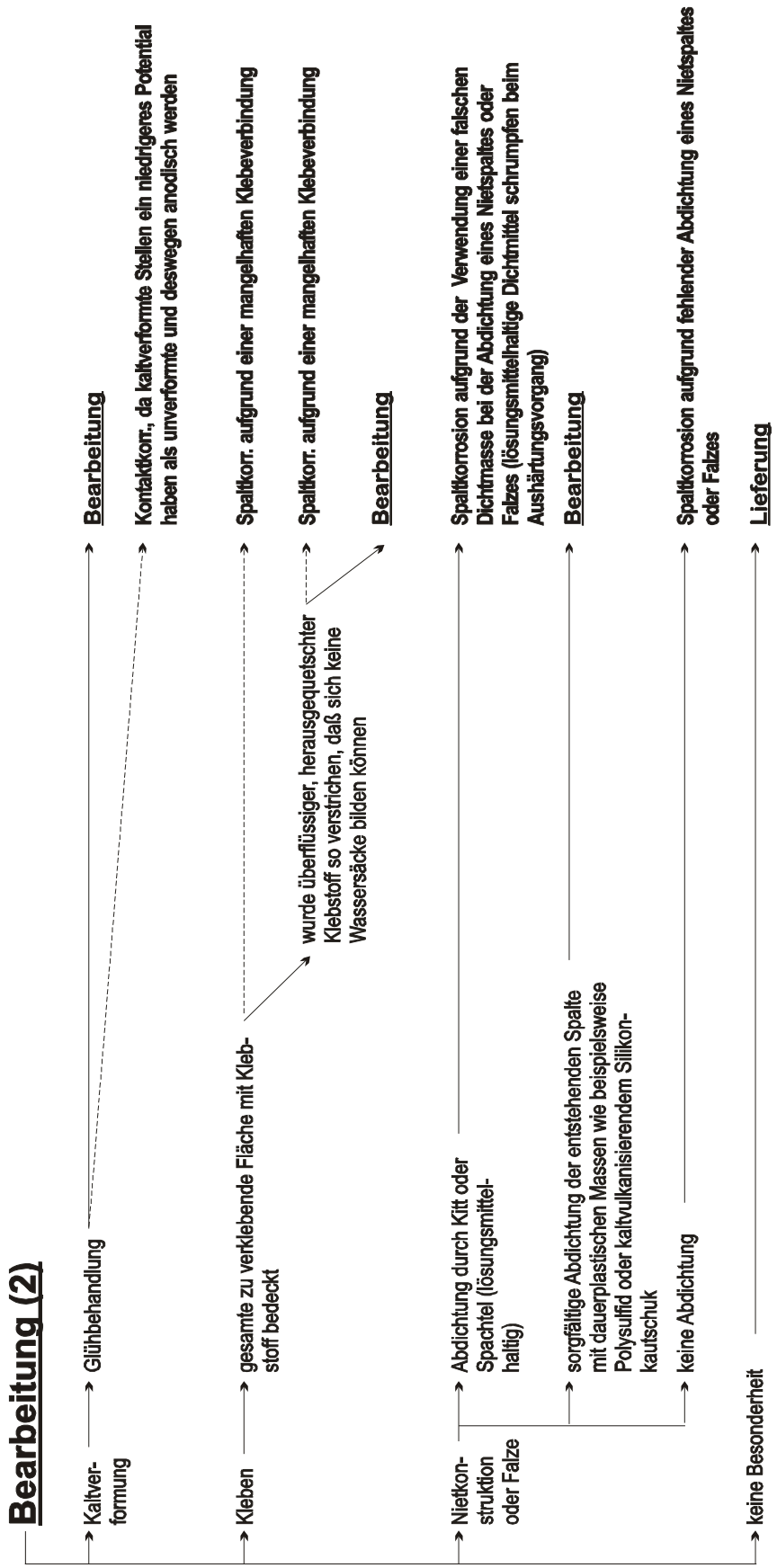


Abbildung 65: Einfluss der Bearbeitung bei un-/niedriglegierten Stählen (Fortsetzung)

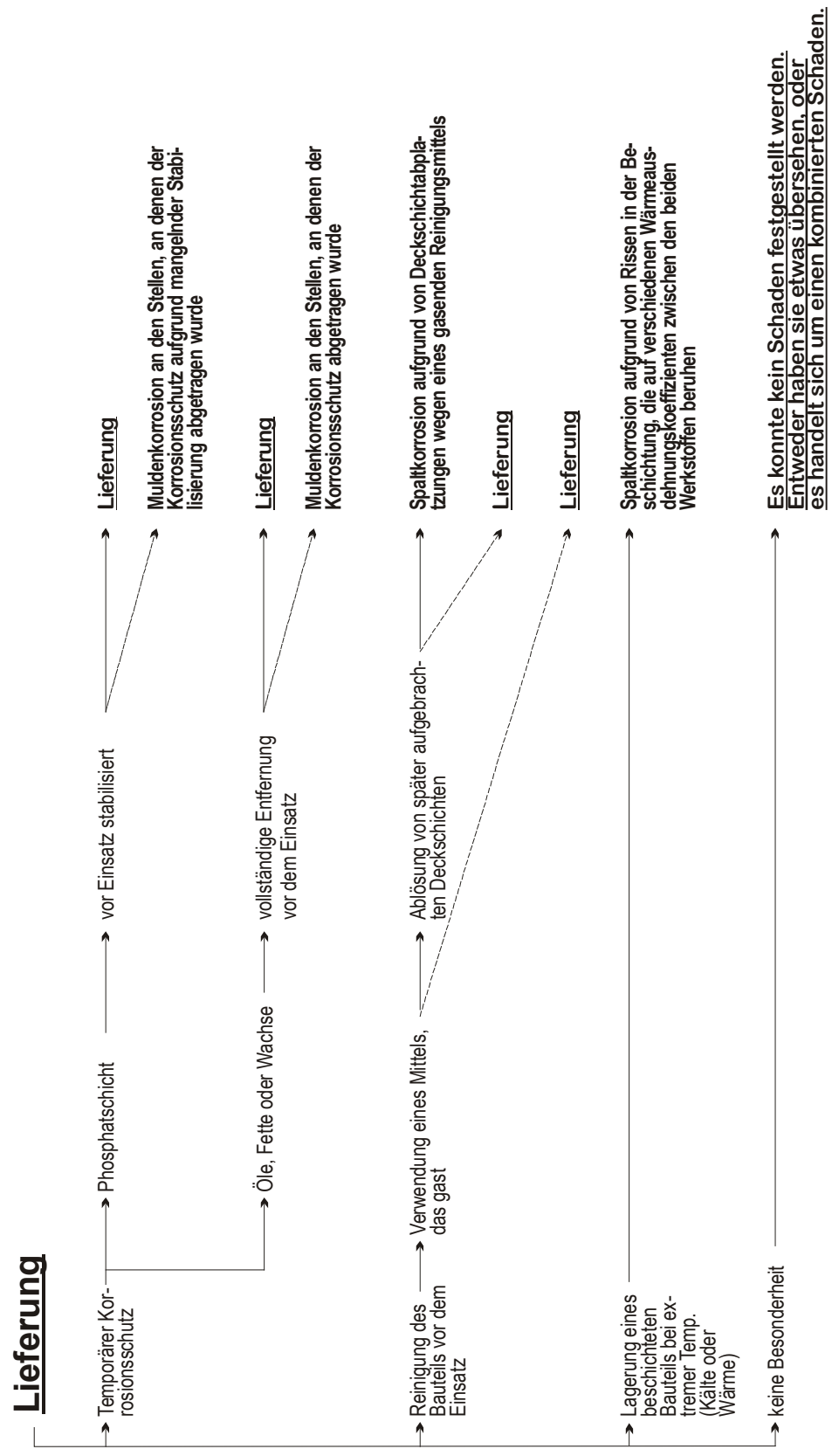


Abbildung 66: Einfluss der Lieferumstände bei un-/niedriglegierten Stählen

5.5.4.2. Korrosionsablaufpläne für nichtrostenden Stahl

Für die folgenden Ablaufpläne gelten dieselben Anmerkungen wie für un-/niedriglegierte Stähle in Kapitel 5.5.4.1..

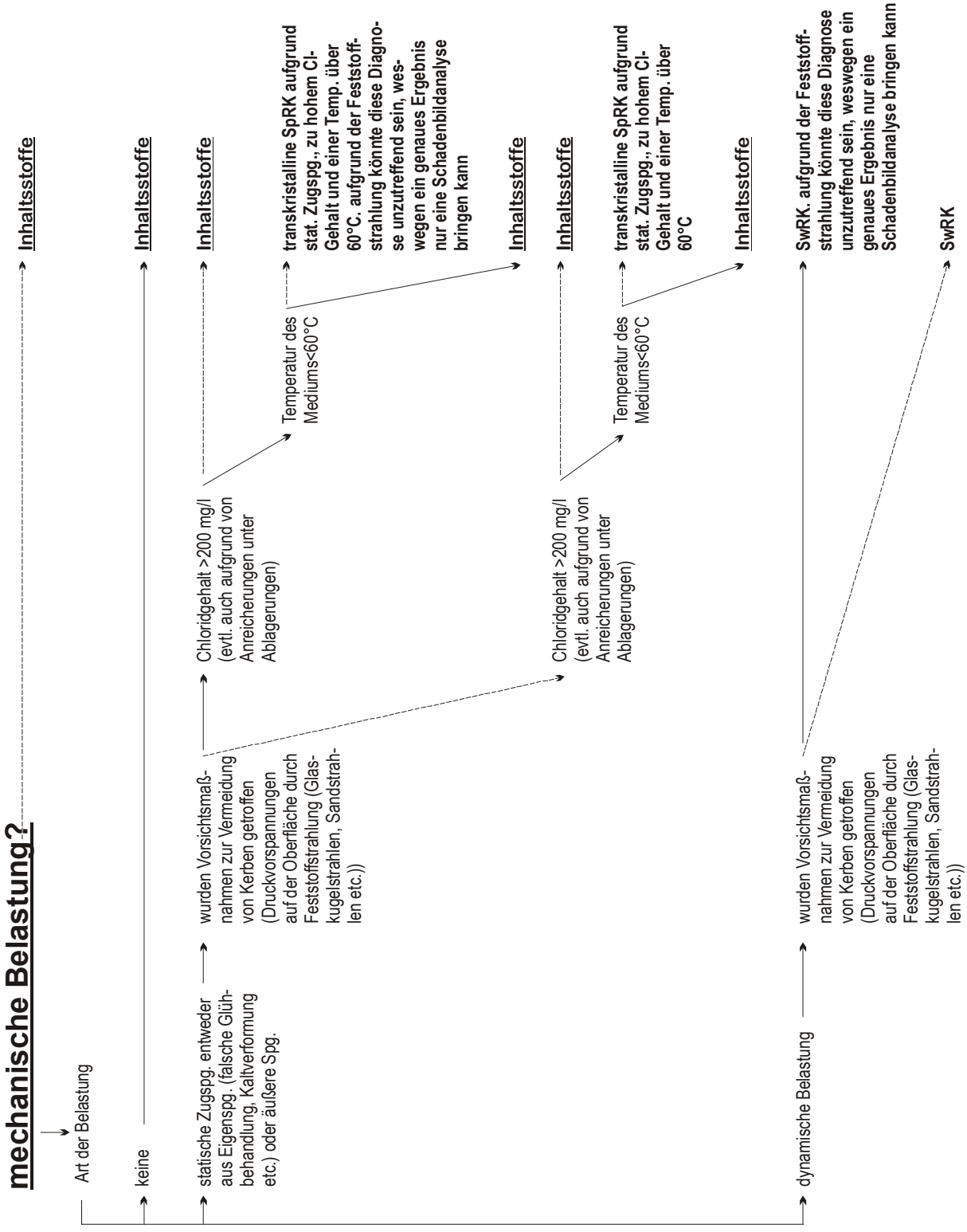


Abbildung 67: Mechanische Einflüsse bei nichtrostenden Stählen

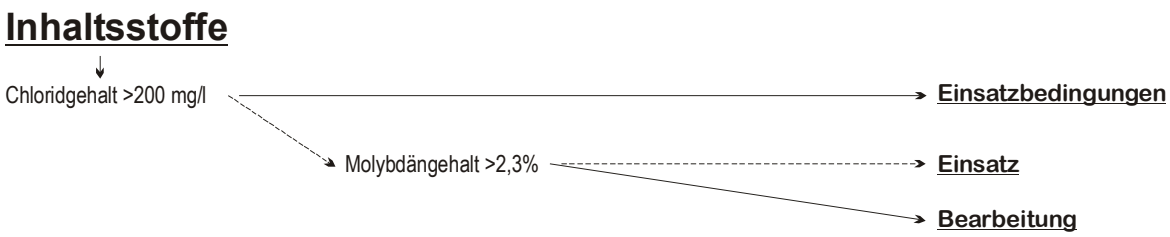


Abbildung 68: Einfluss der Inhaltsstoffe in Medium und Werkstoff bei nichtrostenden Stählen

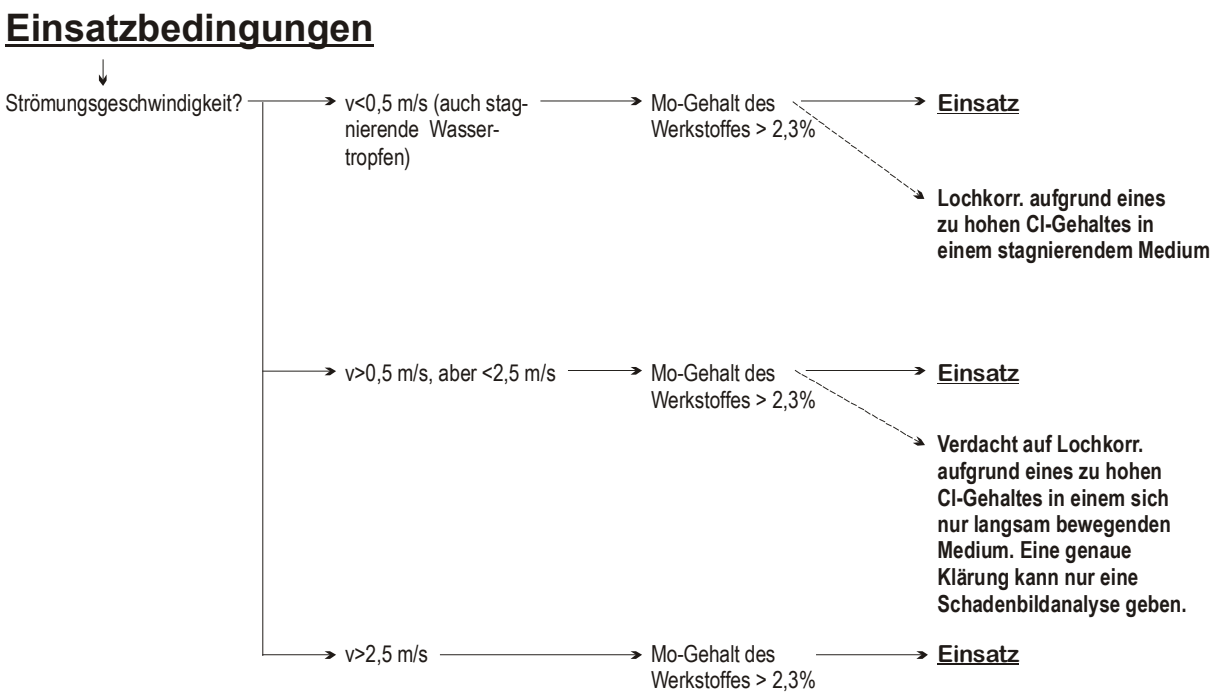


Abbildung 69: Einfluss von Chloriden beim Einsatz von nichtrostenden Stählen

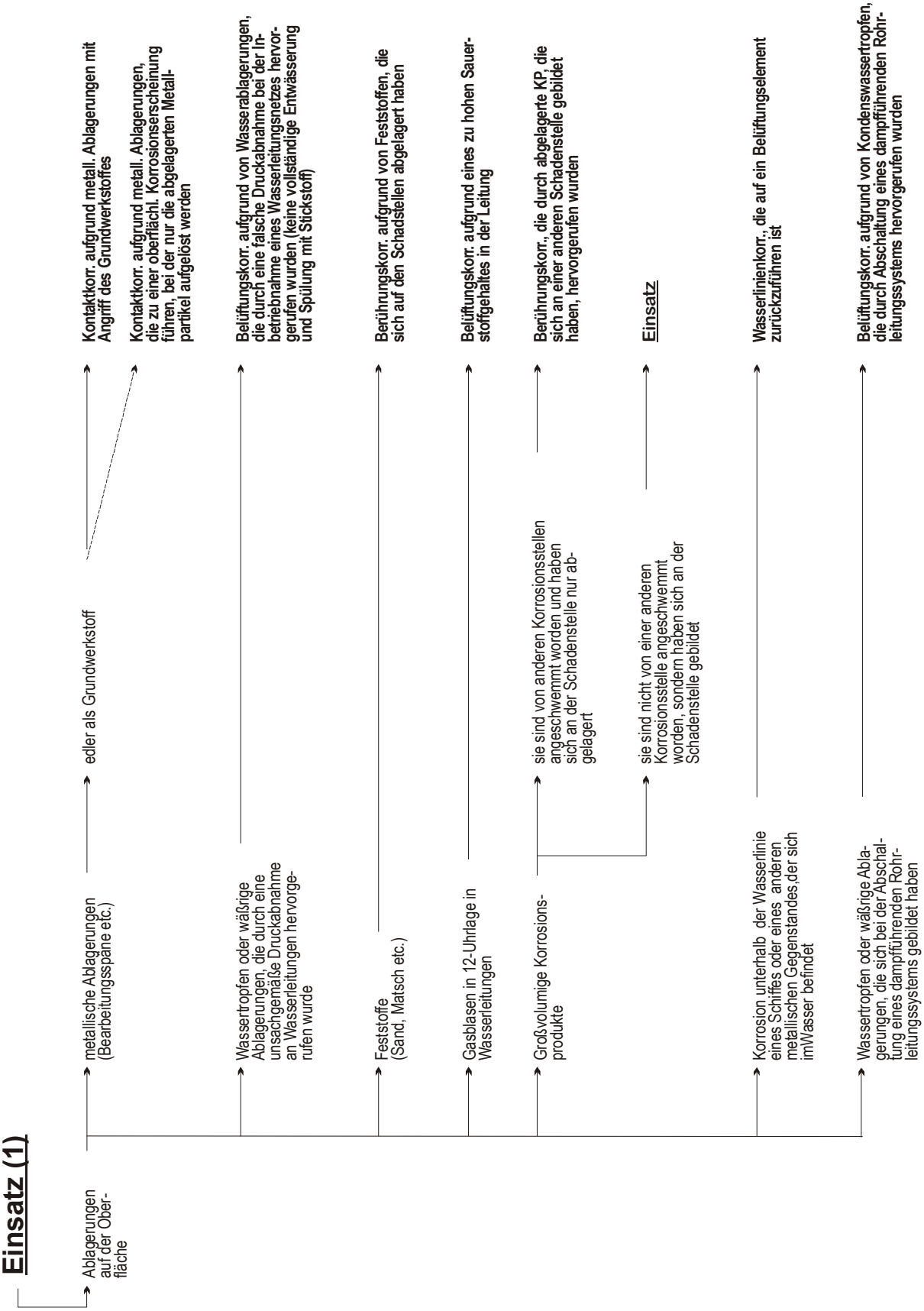


Abbildung 70: Einfluss der Einsatzbedingungen bei nichtrostenden Stählen

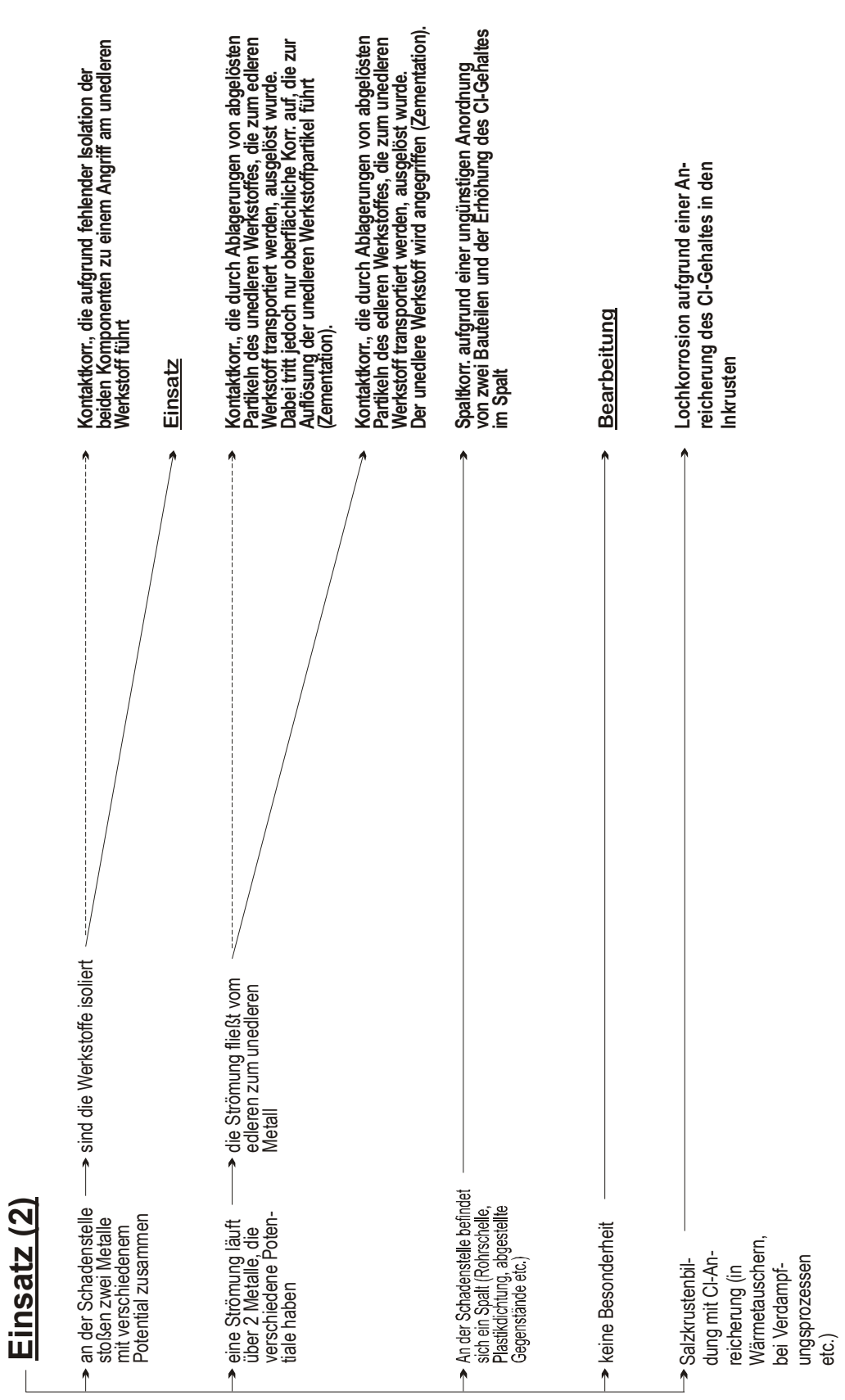


Abbildung 71: Einfluss der Einsatzbedingungen bei nichtrostenden Stählen (Fortsetzung)

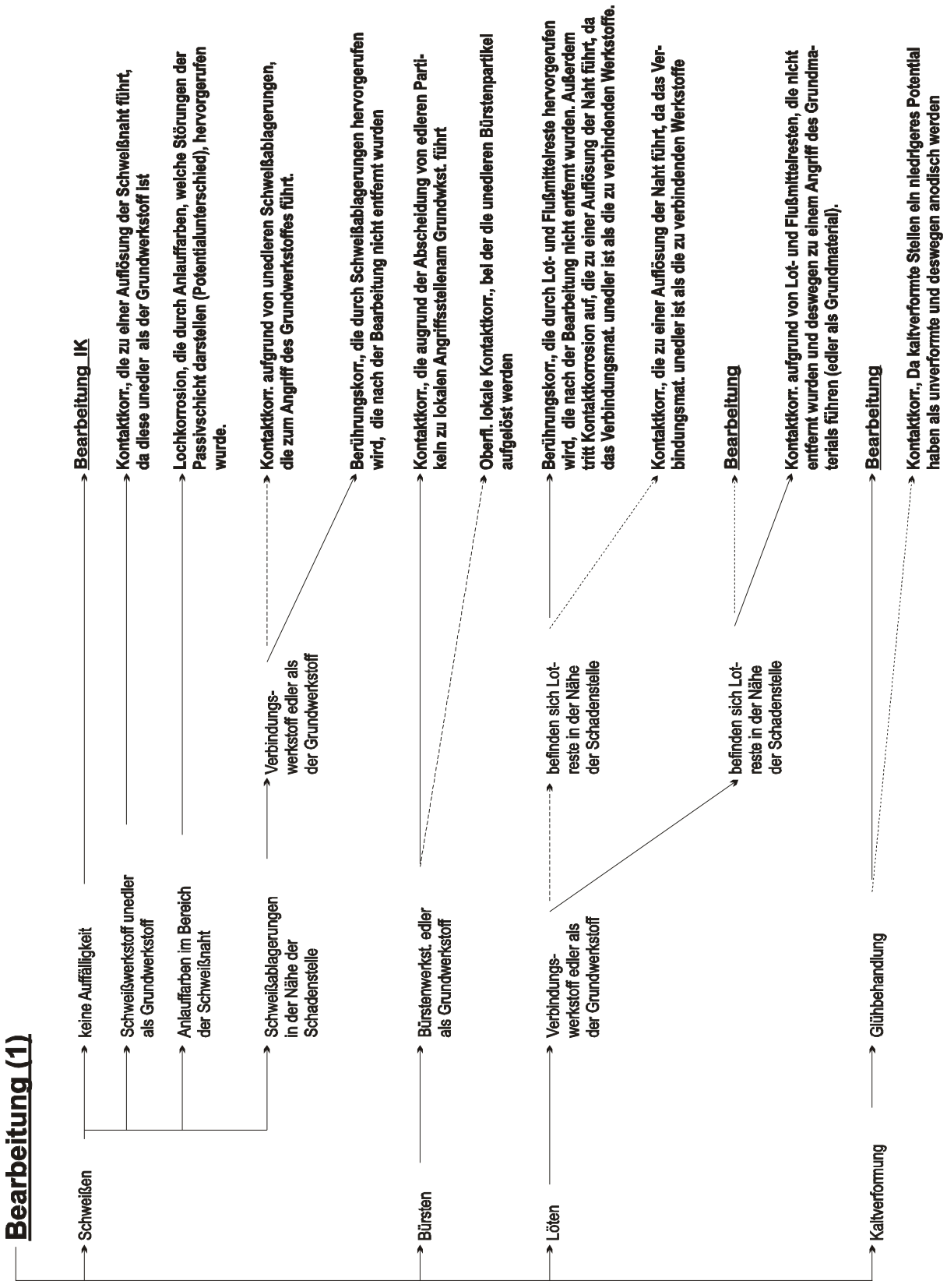


Abbildung 72: Einfluss der Bearbeitung bei nichtrostenden Stählen

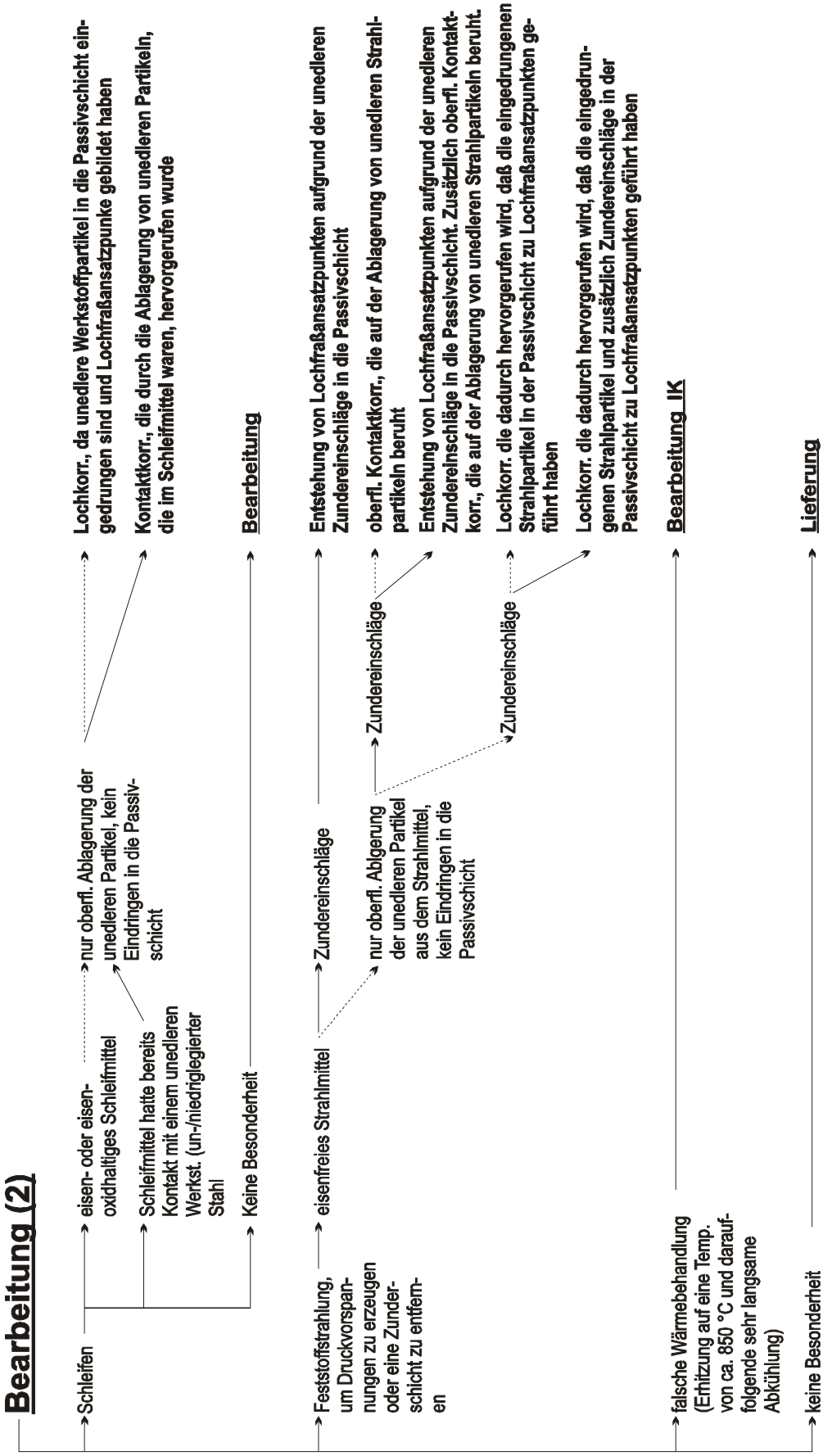


Abbildung 73: Einfluss der Bearbeitung bei nichtrostenden Stählen (Fortsetzung)

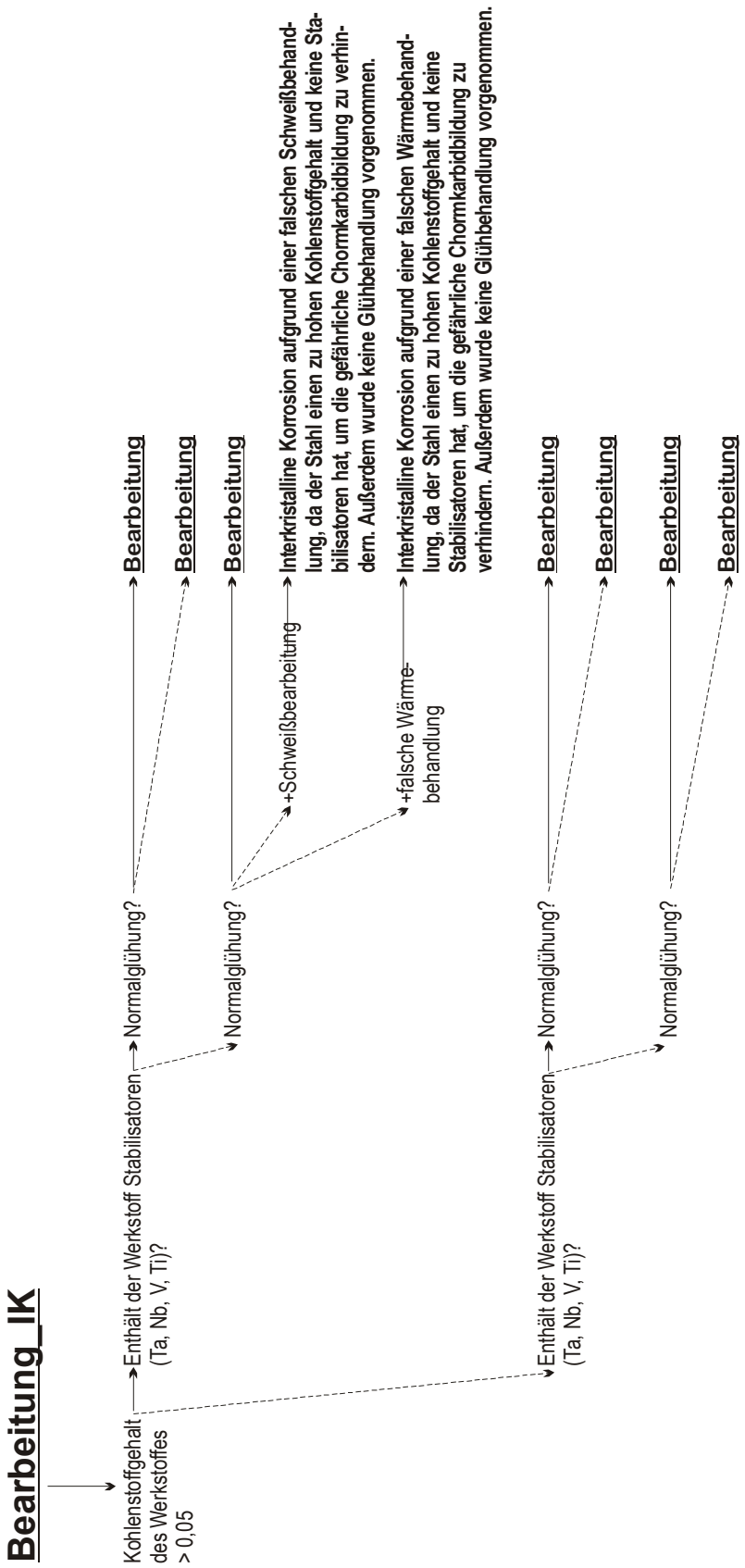


Abbildung 74: Einfluss der Bearbeitung auf die Interkristalline Korrosion bei nichtrostenden Stählen

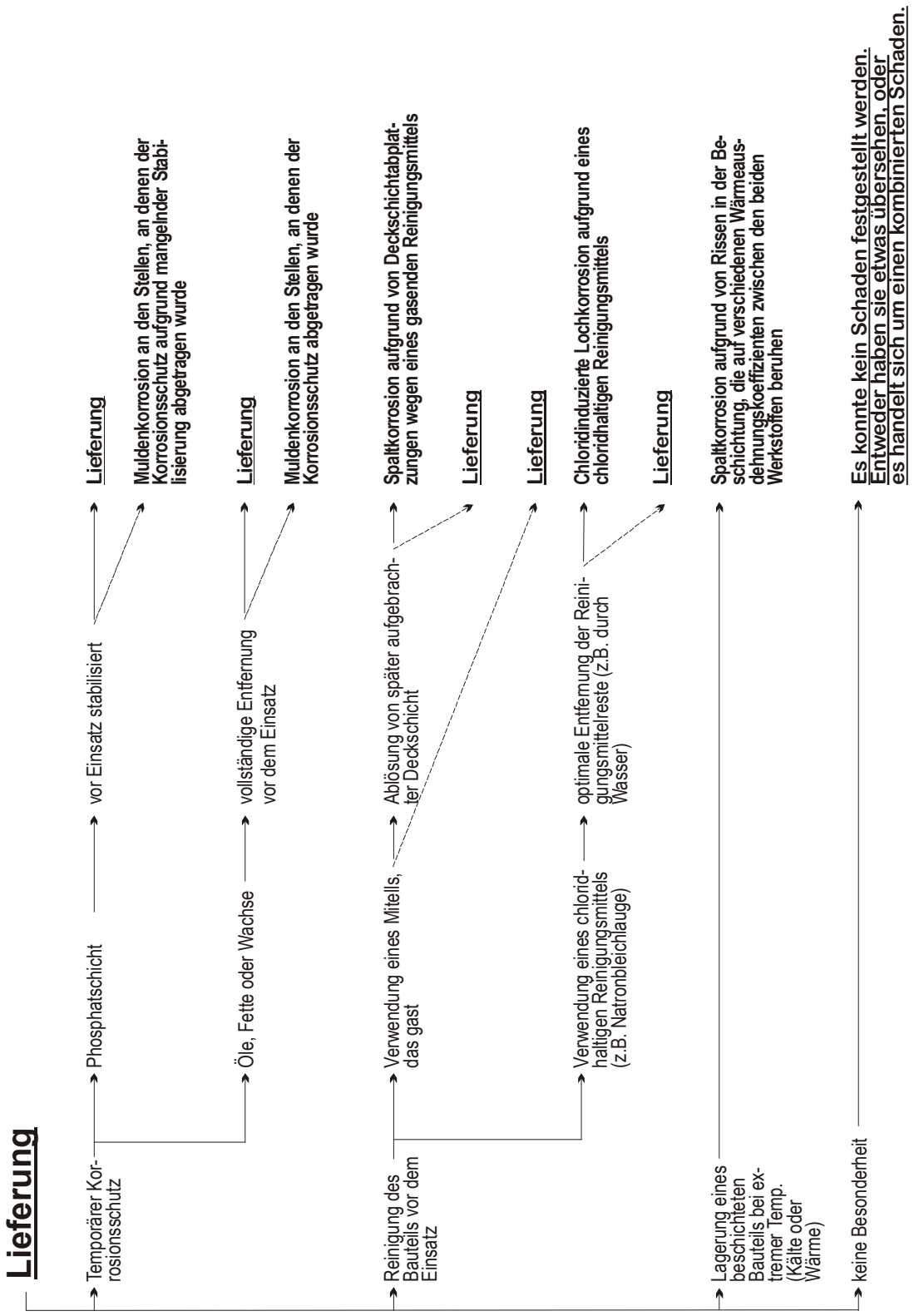


Abbildung 75: Einfluss der Lieferumstände bei nichtrostenden Stählen

5.5.5. Werkstoff-Mediums-Matrix

Neben dem Werkstoff spielt das Medium eine Hauptrolle im Gebiet der Korrosion. Oft kann bereits aus dem Zusammenspiel dieser beiden Komponenten geschlossen werden, ob Korrosion auftritt oder nicht.

Zur genaueren Eingrenzung des Elektrolyten müssen die Haupteinflussgrößen Temperatur und Konzentration berücksichtigt werden [143], so dass aus diesen vier Kenngrößen:

- Werkstoff
- Mediumsart
- Mediumskonzentration
- Mediumstemperatur

eine Datenbank aufgebaut werden kann.

Diese Komponente der rechnergestützten Schadenanalyse ist zweifellos der programmiertechnisch einfachste, aber für den Rechnereinsatz auch aufwendigste der drei Untersuchungsschritte. Dies liegt daran, dass es zahlreiche Paare von Werkstoff-Mediumspaarungen gibt, wobei noch unterschiedliche Konzentrationen und Temperaturen berücksichtigt werden müssen. Zudem können schon geringe Mengen eines Zusatzstoffes wie zum Beispiel Chloride oder Nitrate zu einem stark abweichenden Verhalten eines Werkstoffes im Vergleich zur reinen Lösung führen.

Die Konzentration, die auch durch den pH-Wert angegeben werden kann, hat dabei einen zentralen Einfluss, wie folgende Beispiele verdeutlichen sollen. So ist nichtrostender Stahl nur in alkalischen Lösungen mit niedriger Konzentration beständig, während unlegierte Stähle nur in konzentrierter Salpeter- und Schwefelsäure Beständigkeit besitzen. Das bedeutet, dass man nicht davon sprechen kann, dass ein Werkstoff in einem bestimmten Medium beständig ist oder nicht, sondern dass abgesehen von zusätzlichen Einflussfaktoren wie Einsatzbedingungen oder zusätzlichen Spannungen die Höhe der Konzentration und die Temperatur des Mediums eine bedeutende Rolle spielen.

Die umfangreichste Sammlung über das Verhalten von Werkstoff-Mediumspaarungen stellen die DECHEMA-Werkstofftabellen dar [144]. Sie sind jedoch für eine elektronische Datenbank nicht geeignet, da keine Vergleichbarkeit zwischen den einzelnen Medien hergestellt werden kann. So ist zwar jedes Medium gleich aufgebaut, indem nacheinander die einzelnen Werkstoffe und ihre Legierungen behandelt werden, dennoch werden innerhalb dieser Gruppen nicht immer die vergleichbaren Werkstoffe abgehandelt, da nicht über jede Werkstoff-Mediumspaarung entsprechend umfangreiche Erkenntnisse vorliegen. Außerdem unterscheiden sich die einzelnen Werkstoffe in der Intensität ihrer Behandlung in den Tabellen, so dass bei manchen Medien über einen Werkstoff ausreichendes Material zu finden ist, während er bei einem anderen Medium kaum aufgeführt wird.

Es ist deswegen unmöglich, daraus ein quantifizierbares System für bestimmte Werkstoffe in sämtlichen Medien aufzubauen.

Eine bessere Grundlage für die gegebene Aufgabenstellung sind die Werke von De Renzo und Schweitzer [145, 146], deren Aussagen durch die DECHEMA-Werkstofftabellen und andere Literaturwerte wie zum Beispiel Wranglen, Baumann, Mörbe etc. verifiziert wurden [1, 53, 54, 56, 144].

Es war nicht das Ziel eine vollständige Datenbank aufzustellen, sondern es sollte lediglich beispielhaft gezeigt werden, wie eine derartige Sammlung aufgebaut werden kann. Außerdem steht auch hier wiederum der Anpassungscharakter im Vordergrund, so dass die Datenbank entsprechend den Bedürfnissen eines späteren Nutzers angepasst werden kann.
Als Grundsystem wurden ca. 2000 Datensätze eingegeben, die sich aus der Kombination von knapp 200 Medien mit den Stählen X 5 CrNi 18 9 (1.4301) und X 5 CrNiMo 18 10 (1.4401) in verschiedenen Temperatur- und Konzentrationsbereichen zusammensetzen. Das Ergebnis einer Befragung ist die jährliche Abtragsrate, die das gewählte System aufweist.

5.6. Erstellung des Systems

Erstellung der Wissensbasen

Bis zu diesem Punkt handelte es sich um eine reine Modellierungs- und Systematisierungsarbeit, die entsprechend der Zielsetzung auch ohne Rechnereinsatz einen Sinn ergibt und fähig ist, den Anwender bei der Schadenklärung zu unterstützen. Im nächsten Schritt wurde das in Kap. 5.5. erstellte Modell in eine rechnergeeignete Struktur übertragen, wobei dieser Vorgang durch den modularen Aufbau des Modells erheblich vereinfacht wurde.

Diese Modellübertragung entspricht dem Vorgang der Wissensmodellierung (siehe Kap. 2.2.4.). Dabei wurde das bereits systematisierte Wissen in eine Objektstruktur überführt. Das bedeutet, dass geeignete Klassen, Objekte und Eigenschaften geschaffen wurden, um die Realität in einer computerverständlichen Art abbilden zu können. Die Korrosion bietet sich im Gegensatz zu einem Automobil oder einer Maschine dafür nur wenig an, da sie, auch wenn ihre Auswirkungen sehr erheblich sind, doch ein relativ abstraktes Gebiet ist. Sie kann nur in geringem Umfang durch Formeln beschrieben werden, sondern beruht zum Großteil auf Expertenwissen, das nur schwer zu strukturieren ist.

Bei der Schadenbildanalyse wurde versucht, möglichst eine eindeutige Struktur an Objekten zu wählen, die bei allen Korrosionsarten relevant sind, um eine gleichartige Untersuchung der einzelnen Schadenarten zu gewährleisten. Beispielsweise haben die Objekte Korrosionsproduktlage, Korrosionsproduktaussehen oder Korrosionsauftreten bei allen Korrosionsarten eine charakteristische Erscheinung, während andere dagegen wie Rissaussehen oder Rissverlauf nur bei der Untersuchung der Risskorrosionsarten benötigt werden. Dabei wird wiederum in Objekt und erklärende Eigenschaften des Objekts unterschieden. Das bedeutet, dass der Riss

das Objekt ist, das von den Eigenschaften Aussehen und Verlauf genauer definiert wird (vgl. Abb. 76).

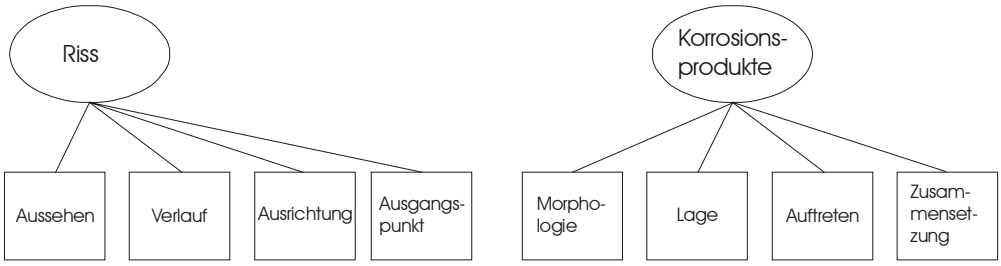


Abbildung 76: Beispielobjekte mit ihren Eigenschaften im Schadenbildanalysesystem

Entsprechend dieser Vorgaben wurde das gesamte Wissen in einzelne Untersuchungsobjekte mit ihren korrespondierenden Eigenschaften, den sogenannten Properties, eingeteilt, die dann je nach Korrosionsart mit dem entsprechenden Wissen gefüllt wurden. Beispielsweise erhält die Objekt-Eigenschafts-Beziehung Auftreten der Korrosion bei Spaltkorrosion den Wert „tritt an unzureichend belüfteten Spalten mit einem Verhältnis von Spaltbreite zu –tiefe von 1:5 und größer auf, wobei Spaltbreiten unter 1 mm besonders kritisch sind“, während sie bei Berührungskorrosion als „tritt unter Ablagerungen (Schlämme, Steine, Sand, Metallspäne oder andere Feststoffe) auf, z.B. in Wasserohren oder Behältern“ definiert wurde.

Nach der Objekterstellung wurden die einzelnen Slots, wie die Objekt-Eigenschafts-Beziehungen genannt werden, mit Hilfe von Regeln verknüpft, so dass dadurch die verschiedenen Korrosionsarten entsprechend der Tabellen in Kap. 5.5. definiert wurden. Dabei stehen im Wenn-Teil der Regel die zur Darstellung einer bestimmten Korrosionsart nötigen Slots mit ihren dazugehörigen Werten, während im Aktionsteil die Schadenart als Ergebnis steht.

Bei der Schadenbearbeitung anhand des Schadenmechanimus wurde analog vorgegangen. Dabei wurde jedoch keine Einteilung nach den einzelnen Kennzeichen vorgenommen, sondern nach den Umgebungsbedingungen oder Einflussfaktoren. Ein Beispiel ist das Objekt Strömung, das durch die Eigenschaften Geschwindigkeit, Feststoffgehalt und Art genauer beschrieben wird (vgl. Abb. 77).

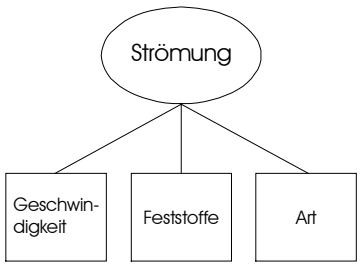


Abbildung 77: Beispielobjekt mit Eigenschaften im Schadenmechanismussystem

Auch hier wurden die verschiedenen Korrosionsursachen nach der Realitätsabbildung durch Objekte in Regeln abgebildet.

Bei der Datenbank zur Beurteilung, ob ein bestimmter Werkstoff in einem Medium einsetzbar ist, werden nur zwei Objekte benötigt, um eine sinnvolle Abfrage zu ermöglichen:

- Werkstoff
- Medium

Dabei wird das Objekt Medium noch durch die Eigenschaften Art, Konzentration und Temperatur ergänzt (vgl. Abb. 78).

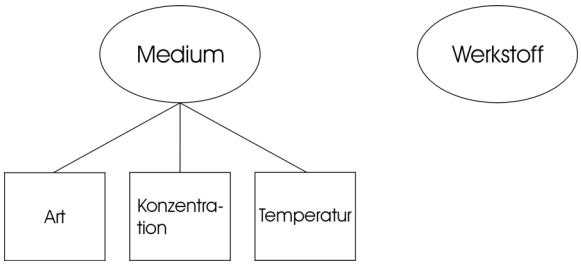


Abb. 78: Objektstruktur Werkstoff/Medium

Ergänzend muss hinzugefügt werden, dass die Modellierung des Korrosionswissens in Kapitel 3. und die Erstellung einer geeigneten Wissensrepräsentation nicht so getrennt ablaufen, wie sie hier beschrieben werden, sondern dass es sich dabei um parallel laufende Prozesse handelt, die dazu dienen, ein möglichst optimales Modell zu erreichen. Ermöglicht wurde dieses Vorgehen durch die Verwendung der hybriden Wissensrepräsentation.

Inferenzstrategie (Metawissen)

Als Inferenzstrategie wurde bei beiden Systemen im Bereich der Grobfragen, also bei der Eingrenzung der Schadenart, der direkte Aufruf einzelner Regeln („Suggestion“) gewählt. Bei den bereits zielgerichteten Fragen wurde eine Mischung aus Wissensinseln und Gates (vgl. Kap. 5.4. „Die Inferenzmaschine“) vorgenommen.
Das bedeutet, dass am Anfang mit einzelnen Fragen große Blöcke übersprungen werden können, während im Falle einer bereits eingegrenzten Schadenart in eine Wissensinsel gesprungen wird, die sich nur noch mit den verschiedenen Ursachen oder Erscheinungskennzeichen der bereits näher bestimmten Korrosionsart befasst, so dass eine schnellere und somit effektivere Suche möglich ist.

Bei der Schadenbildanalyse handelt es sich meist um „Einbahnstraßen“, da nach einer Festlegung mit den ersten Fragen auf eine Schadenart kein Ausweichen auf eine andere Art mehr möglich ist, weil die Kennzeichen meist sehr spezifisch sind. Deswegen gibt es hier auch keine besondere Ausweichstrategie, falls eine Schadenweg doch einmal falsch sein sollte. Die Inferenzmaschine beendet dann lediglich die Abfrage und weist den Anwender darauf hin, dass ein Irrtum vorliegt und dass es sich aufgrund eines Kennzeichens nicht um die Korrosionsart handeln kann, auf die die anderen angegebenen Erscheinungsmerkmale hindeuten.

Im Gegensatz dazu gibt es bei der Schadenmechanismusanalyse viele Verzweigungen, die als mögliche Schadenursachen überprüft werden können, weswegen für den Fall, dass eine Ursache nicht vorliegt, Sprünge vorgesehen wurden, die einen weiteren Ablauf der Wissensabfrage ermöglichen, bis eine Lösung gefunden wird. Die entsprechenden Sprünge können den Ablaufdiagrammen in Kapitel 5.5 entnommen werden, wobei ihre technische Realisierung wiederum durch „Suggestion“ vorgenommen wird (vgl. Kap. 5.4. „Die Inferenzmaschine“).

Darstellungsmöglichkeiten der Systemfragen

Erstellung einer graphischen Oberfläche

Nachdem der Kern des Expertensystems geschaffen worden ist, musste als nächstes eine graphische Benutzeroberfläche erstellt werden, um dem zukünftigen Anwender die Möglichkeit zu geben, das System zu benützen.
Prinzipiell kann man im Falle der RSA zwei unterschiedliche Vorgehensweisen wählen. Zum einen kann man sich für eine statische und zum anderen für eine dynamische Oberflächenstruktur entscheiden.

Statische Oberfläche

Die ersten erfolgreichen Versuche wurden mit einer statischen Oberfläche unternommen. Dabei handelt es sich um einzelne Screens, die alle das gleiche Design haben, aber verschiedene Fragen stellen. Sie werden nacheinander vom System aufgerufen, wenn die Wissensbasis neue Informationen vom Nutzer benötigt. Der Anwender hat dabei die Möglichkeit, die Fragen mit Hilfe von Buttons entweder mit Ja oder Nein zu beantworten (vgl. Abb. 79). In Bereichen, in denen es sinnvoll ist, können auch im Sinne der fuzzy logic beliebige Zwischenstufen zwischen diesen beiden Endstufen eingefügt werden.

Abbildung 79: Frage mit Ja/Nein-Antwortmöglichkeit auf statischem Screen

Für jede Frage wurde ein eigener Screen angefertigt, was einen erheblichen Programmieraufwand und Speicherplatzbedarf nach sich zog. Außerdem ist diese Methode nicht besonders wartungsfreundlich, da die Einführung einer neuen Frage und damit eines neuen Screens, teilweise einen sehr hohen Anpassungsaufwand in den Aufrufanweisungen der bereits erstellten Oberflächen zur Folge hat, was zusätzlich eine bedeutende Fehlerquelle bei der Erweiterung oder Anpassung darstellt.
Diese Methode hat folglich nur dann Sinn, wenn es sich um ein kleines überschaubares System handelt, oder wenn die Screeninhalte sehr individuell sind und nicht standardisiert werden können, wie z. B. Hilfescreens, die sehr verschiedenes graphisches Unterstützungsmaterial enthalten, da Nexpert Object nicht fähig ist, wechselnde Bilder auf einer Standardseite anzuzeigen.
Ein weiterer Nachteil ist, dass Änderungen, die alle Screens betreffen, wie z.B. eine Schriftart- oder Farbänderung langwierig an allen Screens einzeln vorgenommen werden muss.
Alles in allem handelt es sich also um eine sehr unflexible Methode, weswegen ein anderer Weg beschritten wurde.

Dynamische Oberfläche

Wie bereits festgestellt, muss der Anwender bei der Schadenanalyse eine Reihe von Fragen beantworten, die sich jeweils mit verschiedenen Kennzeichen beschäftigen. Bei der Methode der statischen Oberfläche muss für jede Verhaltensmöglichkeit eines Merkmals eine spezielle Frage entwickelt werden, was zu einer relativen Unübersichtlichkeit führt. Deswegen ist es einfacher, gezielt nach einem Kennzeichen zu fragen und dann verschiedene Möglichkeiten zur Auswahl anzubieten.
Ein Beispiel für diese Vorgehensweise, die der des Experten näher steht, ist die folgende Frage mit den korrespondierenden Antwortmöglichkeiten (vgl. Abb. 80):

Abbildung 80: Frage auf einer dynamischen Oberfläche mit mehreren Antwortmöglichkeiten

Das hat zur Folge, dass man nicht mehr für jede Antwortmöglichkeit einen eigenen Screen benötigt. Dieses System wäre genauso bei den statischen Oberflächen einsetzbar, wobei man

allerdings jede Antwortmöglichkeit einzeln aus der Wissensbasis heraussuchen und in den Screen eintragen müsste, um zu verhindern, dass eine Regel nicht gefeuert werden kann, da eines ihrer Kennzeichen nicht vollständig abgefragt wird.
Für diesen Fall bietet die Expertensystementwicklungsshell Nexpert Object einige Features, die durch eine entsprechende Zusammensetzung den Einsatz der dynamischen Oberflächen ermöglichen. Diese Oberflächen bestehen in der Hauptsache aus (vgl. Abb. 81):

- einer variablen Fragezeile
- einer variablen Choice-Box und
- einer Auswahlanzeige.

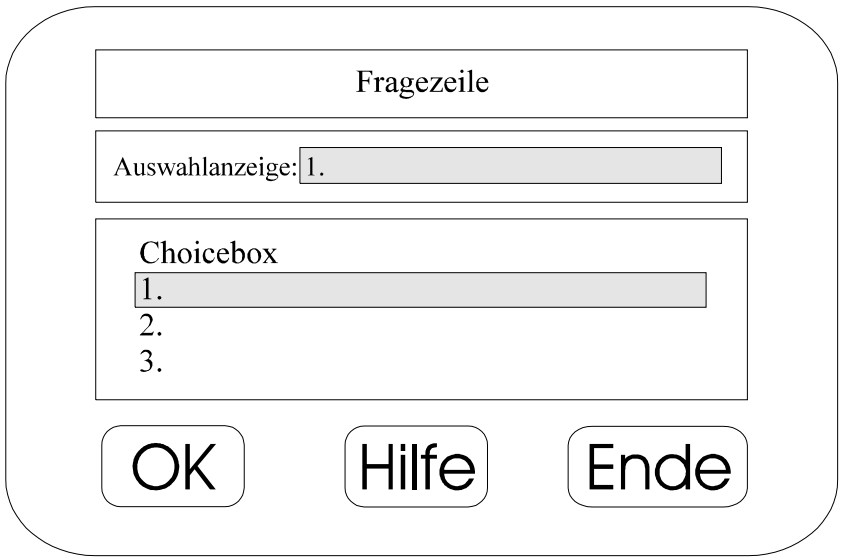


Abbildung 81: Grundmodell einer dynamischen Oberfläche

Das bedeutet also, dass es sich immer um den gleichen Screen handelt, der mit einer variablen Zeile ausgestattet ist, die die gerade aktuelle Frage nach einem bestimmten Kennzeichen anzeigt. Passend zu dieser Frage werden in der Choice-Box die entsprechenden Antwortmöglichkeiten dargestellt, die im Falle einer Testauswahl zur Prüfung in der Auswahlanzeige angezeigt werden und eventuell wieder verworfen werden können.
Die Auswahl der gerade zu beantwortenden Frage geschieht durch den Inferenzmechanismus, der in diesem Fall über den sogenannten Meta-Slot-Editor in Erscheinung tritt. Er weist jeder Objekt-Eigenschafts-Beziehung eine bestimmte Frage zu, die vom Systemersteller formuliert wurde. Des weiteren sucht er in der gesamten Wissensbasis nach den möglichen Antworten, die für diese Beziehung enthalten sind. Somit kann man sicher sein, dass keine Antwortmöglichkeit übersehen wird, wenn keine Tippfehler enthalten sind. Außerdem ist diese Methode sehr wartungsfreundlich, da ein Fragekomplex automatisch aktualisiert wird, wenn eine neue Antwortmöglichkeit zum Regelnetz hinzugefügt wird.
Diese Methode der dynamischen Oberfläche hat sowohl für Anwender als auch Systemersteller und -betreuer zahlreiche Vorteile.

Der Anwender muss sich nicht auf sich ändernde Screens einstellen, sondern kann jede Frage nach einem gewohnten System bearbeiten. Außerdem kann die Oberfläche schnell und problemlos seinen Wünschen angepasst werden, ohne tiefgreifende Änderungen im System vornehmen zu müssen.
Für den Systemersteller eröffnen sich mit dieser Methode neue Freiheiten, aber auch Schwierigkeiten. So verlagert er die ganze Steuerung von der Oberfläche in die Inferenzmaschine, in die sie ursprünglich auch gehört. Dementsprechend kann er den Ablauf viel variabler gestalten und entsprechende Änderungen an einer zentralen Stelle in der Wissensbasis vornehmen, die leichter zu überschauen ist. Er kann sich somit, nachdem er sich über das Aussehen und das Innenleben (Scripting) der gewählten Oberfläche klar geworden ist, vollständig der Wissensimplementierung widmen.
Zudem kann er eine einmal erstellte graphische Oberfläche ohne besonderen Anpassungsaufwand auch für andere Schadengebiete verwenden, was Teil der Zielstellung war.

Da das System nicht mit den Anfangsdaten bereits komplett sein kann, sondern ständig dem neuesten Stand der Kenntnisse angepasst werden soll und muss, kam nur diese Vorgehensweise in Frage, da sie auf einfache Weise das Hinzufügen von Regeln und neuem Wissen ermöglicht.
Außerdem nutzt diese Programmierweise die Vorteile der objektorientierten Wissensrepräsentation besser, da eine starke Bindung an die Objekte besteht, die somit erheblich in den Ablauf einer Sitzung eingreifen.

6. Beispiele zur Überprüfung der Arbeitsweise des Systems im Vergleich zu einem menschlichen Gutachter

Da es das Ziel dieser Arbeit ist, die Grenzen und Möglichkeiten einer rechnergestützten Schadenanalyse aufzuzeigen, soll in diesem Abschnitt gezeigt werden, dass es möglich ist, mit Hilfe des Systems zur selben Schlussfolgerung zu gelangen wie ein menschlicher Experte.

6.1. Beschreibung des Basisgutachtens [139]

In einer Industrieanlage wurden die Laufroste, Treppen und Geländer aus nichtrostendem CrNi-Stahl gefertigt. Nach einer Betriebszeit von einem dreiviertel Jahr wurden bereits Korrosionserscheinungen festgestellt.
Es handelte sich bei dem Werkstoff um einen austenitischen CrNi-Stahl mit der Werkstoff-DIN Nr. 1.4301, der kein Molybdän enthält und somit in chloridfreien Medien eine ausgezeichnete Korrosionsbeständigkeit besitzt. Bei der Betrachtung der Umgebungsbedingungen, die auf die Bauteile eingewirkt haben, wurden keine Besonderheiten festgestellt, wobei eine korrosive Beanspruchung während des Betriebs lediglich durch die relativ konstante Innenraumatmosphäre, die aus Luft bei einer Temperatur von 6-8 °C bestand, vorlag.
Der einzige Anhaltspunkt für eine ernsthafte korrosive Beanspruchung war die Reinigung bzw. Desinfektion der Einrichtungen nach dem Abschluss der eigentlichen Bauarbeiten mit Natronbleichlauge.

An einer Strebe des Handlaufes und einem Seitenteil des Treppenträgers wurden nadelstichartige Korrosionsstellen gefunden, in deren Umgebung Spuren einer eingetrockneten Flüssigkeit zu erkennen waren. Derartige Spuren wurden auch an anderen Stellen entdeckt, an denen sie jedoch keine Anfressungen verursacht hatten, sondern lediglich zu eingetrockneten Fließspuren von Korrosionsprodukten geführt haben.

Diese Beobachtungen führten zu der vorläufigen Schlussfolgerung, dass es sich um Lochkorrosion handeln muss, die durch Einwirkung eines chloridhaltigen Mediums hervorgerufen wurde. In den folgenden Untersuchungsschritten wurde die für Lochkorrosion typische Angriffsmorphologie nachgewiesen. Dazu wurden makroskopische, lichtmikroskopische und feinbereichsanalytische Untersuchungen vorgenommen.

Bei der makroskopischen Untersuchung wurde festgestellt, dass es sich um einen lokal sehr begrenzten Materialangriff handelte, bei dem keine Hinweise auf eine gleichmäßig flächenabtragende Korrosion identifiziert werden konnten. Außerdem waren bei der lichtmikroskopischen Untersuchung im Querschliff die für chloridinduzierte Korrosion halbkugeligen Lokalkorrosionsstellen zu erkennen, wobei keine Beläge oder Ablagerungen entdeckt werden konnten. Auch voluminöse Korrosionsprodukte waren nicht beobachtbar.
Bei der feinbereichsanalytischen Untersuchung wurden Chloride in den lokalen Korrosionsstellen nachgewiesen, während auf der nicht korrodierten Oberfläche quasi kein Chlor gefunden wurde.

Als endgültige Schlussfolgerung wurde festgestellt, dass die Schäden eindeutig auf chloridinduzierte Lochkorrosion zurückzuführen sind, wobei die Chloride mit großer Wahrscheinlichkeit aus dem Reinigungsmittel „Natronbleichlauge“ stammen.
Somit wurde als Ursache die großzügige Handhabung der Natronbleichlauge verbunden mit einer ungenügenden Reinigung der benetzten Bauteile festgestellt.

6.2. Überprüfung des Ergebnisses mit der rechnergestützten Schadenanalyse

Dieses Ergebnis wurde mit der rechnergestützten Schadenanalyse überprüft. Der erste Schritt dabei wäre eine Überprüfung der Beständigkeit des Werkstoffes in dem vorliegenden Medium. Da jedoch kein Medium vorhanden ist, wird dieser Schritt übersprungen und gleich eine Schadenanalyse anhand des Schadenmechanismus vorgenommen.

Nach dem Aufruf des Systems für nichtrostende Stähle gelangt man zur ersten Frage, ob eine mechanische Belastung vorgelegen hat oder nicht (vgl. Kap. 5.5.4.). Mit der eindeutigen Ablehnung einer mechanischen Beanspruchung wird sofort der große Block der Risskorrosionsarten ausgeschlossen.
Beim nächsten Verzweigungspunkt, ob der Chloridgehalt größer als 200 mg/l war, fällt ebenfalls die Entscheidung für Nein. Genauso bei der Frage nach einem Molybdängehalt von mehr als 2,3 %, da es sich um einen molybdänlosen CrNi-Stahl unter mediumsloser Beanspruchung handelt.

Nach diesen Vorfragen gelangt man in den Hauptkomplex des Einsatzes (vgl. Abb. 82). Dabei werden bereits alle Möglichkeiten, die auf Kontaktkorrosion aufgrund des Zusammenwirkens zweier Werkstoffe mit verschiedenem Potential zurückzuführen wären, ausgeschlossen, da es sich bei dem in der Anlage verwendeten Werkstoff durchgehend um 1.4301 handelt.
Laut der weiteren Untersuchungsangaben sind weder Salzkrustenbildungen noch Ablagerungen weder organischer noch metallischer Art festzustellen. Belüftungs- oder Wasserlinienkorrosion scheiden aufgrund der trockenen Umgebung ebenfalls aus.

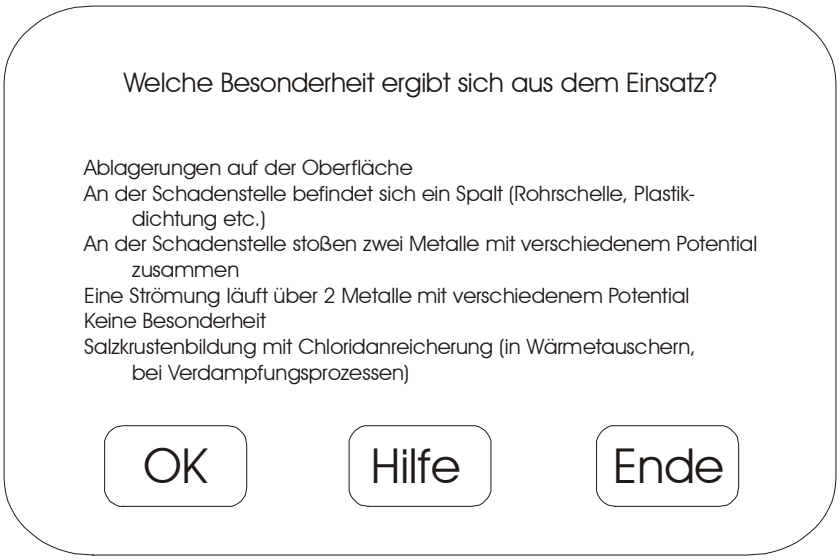


Abbildung 82: Auswahlmöglichkeiten im Bereich „Einsatz“

Somit können also beim Einsatz keine Besonderheiten erkannt werden, weswegen das System in den nächsten Fragekomplex „Bearbeitung“ verzweigt (vgl. Abb. 83).

Abbildung 83: Auswahlmöglichkeiten im Bereich „Bearbeitung“

Da keine Hinweise vorliegen, dass die Anlagenteile kaltverformt, geschliffen, gelötet oder gebürstet wurden, können auch diese Fehlermöglichkeiten ausgeklammert werden. Auch auf eine falsche Wärmebehandlung oder eine Feststoffstrahlung zur Erzeugung von Druckvorspannungen deutet nichts hin, weswegen nur noch die Möglichkeit des Schweißens übrig bleibt, da die einzelnen Bauteile teilweise durch Schweißen verbunden wurden.
Doch auch hier sind keine Fehler feststellbar. Es fand keine Kontaktkorrosion statt, da der Schweißwerkstoff vorschriftgemäß edler ist als die zu verbindenden Teile. Weiterhin befinden sich keine Schweißablagerungen in der Nähe der Schadstellen.

Es liegen nur teilweise Anlauffarben vor, die jedoch nicht weiter geschädigt sind und somit leicht abgebeizt werden können, womit auch Lochkorrosion aufgrund von Anlauffarben, die Störungen der Passivschicht darstellen und somit aufgrund des Potentialunterschiedes zur Passivschicht korrosionsanfälliger sind, ausscheidet.
Da also auch im Bereich Bearbeitung die Schadenursache nicht gefunden werden konnte, folgt eine Verzweigung in den letzten Komplex Lieferung.

Weil keinerlei Hinweise auf einen temporären Korrosionsschutz vorliegen, bleibt nur der Punkt der Reinigung der Bauteile vor dem Einsatz. Die weiteren Fragen müssen vom Gutachter nun etwas interpretiert werden, da sonst nie eine Lösung gefunden werden kann. So kann die nächste Frage nach der Verwendung eines chloridhaltigen Reinigungsmittels bejaht werden, wenn der Anwender weiß, dass Natronbleichlauge Natriumhypochlorit mit der Zusammensetzung NaOCl ist und bis zu 12,5 % wirksames Chlor enthalten kann [147]. Die nächste Frage, ob eine optimale Entfernung der Reinigungsmittelreste zum Beispiel durch Wasser stattgefunden hat, kann verneint werden, da es sonst nicht möglich wäre, dass an mehreren Teilen der Anlage eingetrocknete Reinigungsmittelspuren gefunden werden können.

Somit erhält man als Ergebnis Abbildung 84:

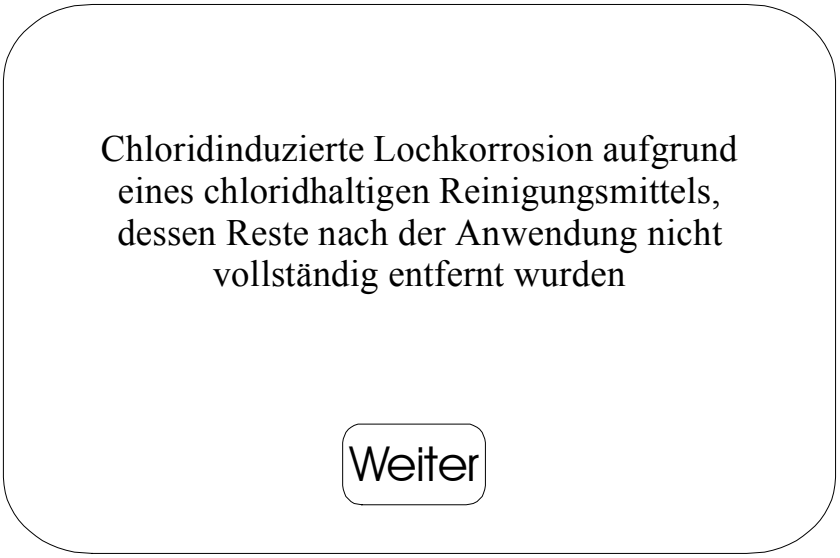


Abbildung 84: Ergebnis einer Schadenmechanismusanalyse

Diese Ergebnis soll nun mit dem Schadenbildanalysesystem unabhängig überprüft werden.
Dabei gelangt man als erstes zu der Frage nach der makroskopischen Erscheinungsart, die eindeutig mit „Vertiefungen (lokale Korrosion)“ beantwortet werden kann, da weder Risse noch gleichmäßige Korrosion vorliegen (vgl. Kap. 5.5.3.).
Im Komplex der Vertiefungen steht man nun vor der Frage, ob es sich um muldenförmige Korrosionserscheinungen oder um nadelstichartige Anfressungen (vgl. Abb. 85) handelt, die nicht zusammenhängen. Entsprechend ihres Aussehens und da sie unzusammenhängend auf einer größeren Fläche vorliegen, werden die nadelstichartigen Vertiefungen gewählt, womit man in den Fragebereich der makroskopischen Untersuchung gelangt.

Abbildung 85: Auswahlmöglichkeiten zum Bereich „Vertiefungen“

Die weiteren Fragen dieses Komplexes können eindeutig befürwortet werden, da der Materialabtrag nur in der Korrosionsstelle vorliegt, während die sonstigen Werkstoffbereiche praktisch nicht angegriffen sind. Außerdem haben die angegriffenen Stellen eine gleiche oder größere Tiefe als der Durchmesser des Loches groß ist. Der Gewichtsverlust ist minimal im Vergleich zum Gesamtgewicht und zudem liegen keine Korrosionsprodukte vor. Damit ist auf der Ebene der makroskopischen Untersuchung bewiesen, dass es sich um Lochkorrosion handelt.
Die Fragen bei der lichtmikroskopischen Untersuchung sind, ob es sich um halbkugelige Vertiefungen handelt und ob eine scharfe örtliche Begrenztheit des Angriffes vorliegt, was zusätzlich als scharfe Abtrennung zwischen Loch und Umgebung definiert wird. Beides trifft an den Schadenstellen zu, weswegen auch hier als Schadenart Lochkorrosion festgestellt wird.
Auch bei der elektronenmikroskopischen Untersuchung wird eine scharfe Abgrenzung des Angriffs im Gegensatz zur umgebenden unbeschädigten Oberfläche beobachtet, was wiederum zur Korrosionsart Lochkorrosion führt.
Als letztes wird eine feinbereichsanalytische Untersuchung vorgenommen, bei der sowohl im Lochgrund als auch im Medium Halogenide zur Bestätigung gefordert werden. Beides kann unter Berücksichtigung der Erkenntnis, dass im Reinigungsmittel Chloride enthalten waren, bejaht werden, womit sich auch hier die Lochkorrosion als bewiesen zeigt.

Dies führt wiederum zu einem Ergebnisscreen mit folgendem Aussehen (vgl. Abb. 86):

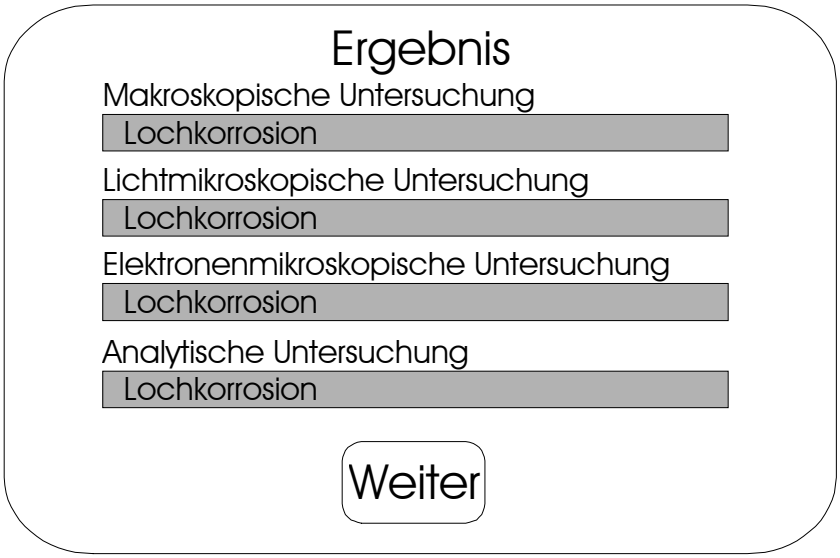


Bild 86: Ergebnisfenster der Schadenbildanalyse

6.3. Überprüfung der Datenbank des Werkstoff-Medium-Beständigkeitssystems

Nun soll noch überprüft werden, ob die Feststellung, ob ein Werkstoff für ein bestimmtes Medium geeignet ist, praxisnah ist. Der menschliche Gutachter ermittelt zuerst den Werkstoff und betrachtet dann die Zusammensetzung des Mediums, seine Temperatur und seine Konzentration, wobei die Temperatur oft gar nicht berücksichtigt wird wie zum Beispiel in den Verträglichkeitstabellen von Wranglen [56]. Andere Daten, abgesehen von den Inhaltsstoffen, sind zusätzlich nicht erforderlich.
Die Vorgehensweise der rechnergestützten Schadenanalyse ist entsprechend, weswegen der Anwender mit folgendem Screen um die entsprechenden Daten gebeten wird (vgl. Abb. 87).

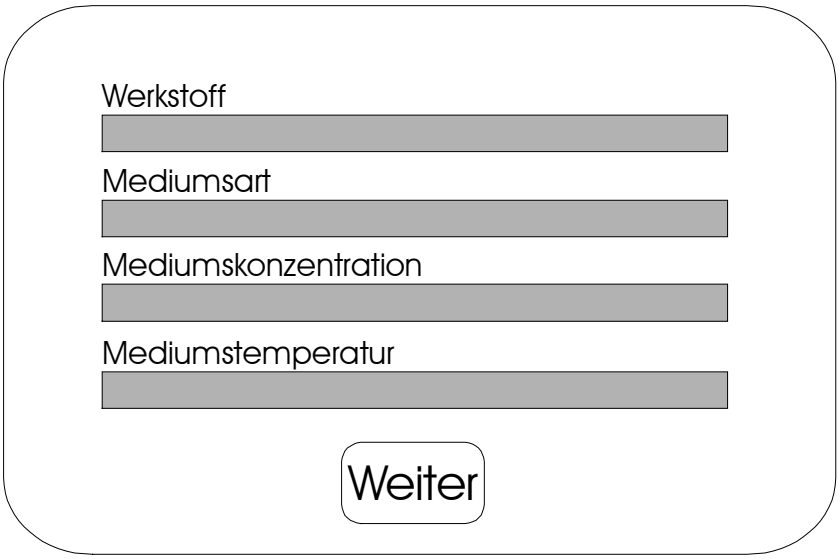


Bild 87: Abfragescreen der Werkstoff-Medium-Beständigkeitsprüfung

Der Abfragebildschirm spiegelt also exakt die Vorgehensweise des menschlichen Gutachters wieder, wobei das System als Ergebnis die jährlich Abtragsrate ausgibt. Ein Beispiel der Richtigkeit der Angaben soll ein Vergleich des Systems mit den Werkstofftabellen aus [145] zeigen. De Renzo gibt für den Werkstoff 1.4301 in Schwefeldioxid bei 90 %-iger Konzentration und einer Temperatur von 50°C eine jährliche Korrosionsrate größer als 1,27 mm/a an. Diese Aussage bedeutet, dass der gewählte Werkstoff unter diesen Bedingungen in Schwefeldioxid unbeständig ist.
Eine Systemanfrage mit diesen Werten führt zum gleichen Ergebnis, das in Abbildung 88 gezeigt ist:

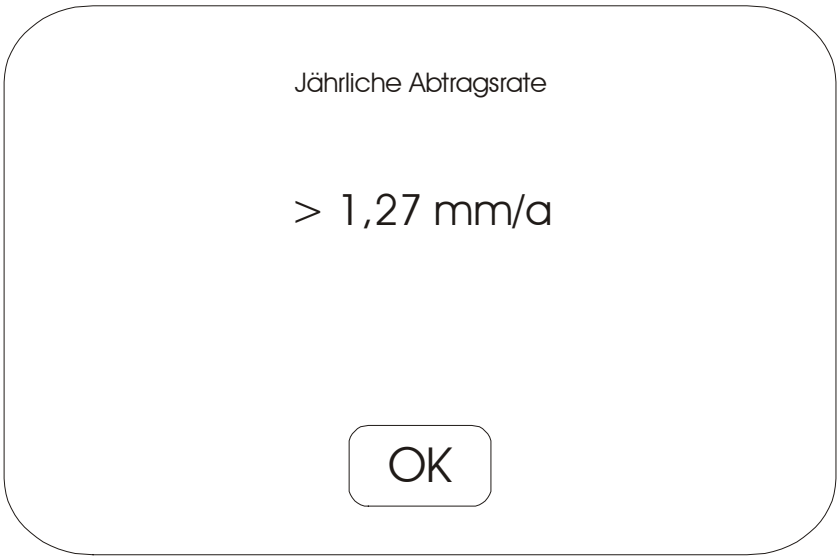


Abbildung 88: Ergebnis einer Systemanfrage

7. Diskussion und Ausblick

Im Bereich der Forschung der Künstlichen Intelligenz konnten in den letzten Jahren zweifellos Erfolge verbucht werden, was jedoch nicht darüber hinwegtäuschen kann, dass der Computer nach wie vor hauptsächlich als Rechensystem zur graphischen Auswertung, als Textverarbeitung oder als leistungsfähige Datenbank eingesetzt wird. Es handelt sich um Tätigkeiten, die im Prinzip primitiv sind und den menschlichen Bearbeiter nur unnötig Zeit kosten, die er für komplexere Aufgaben sinnvoller verwenden kann. Der Rechnereinsatz dient somit der Entlastung, da das menschliche Gehirn nicht fähig ist, in einer vergleichbaren Geschwindigkeit Daten zu durchsuchen und zu vergleichen. Außerdem sind Rechner und ihre Ausführungsorgane wie Roboter oder Terminals imstande, sich ständig repetierende Vorgänge ermüdungs- und fehlerfrei zu steuern und auszuführen.
Diese Beschränkung auf unterstützende Tätigkeiten beruht hauptsächlich darauf, dass es bis jetzt noch nicht gelungen ist, dem Computer die Verwendung assoziativer Verknüpfungen zu implementieren. Sie ermöglichen es dem Menschen nämlich erst, Verbindungen zwischen zwei anscheinend völlig unzusammenhängenden Vorgängen herzustellen, was für die Bewältigung umfassender Probleme, die nicht nur eindimensional sind, sondern sich aus übergreifendem Wissen wie im Falle der Korrosion zusammensetzen (vgl. Kap. 5.5.2), unerlässlich ist.

Das große Problem der Künstlichen Intelligenz beruht folglich auf der völlig unterschiedlichen Arbeitsweise von Mensch und Computer. Alles, was der Computer weiß, muss vorher von einem Menschen erdacht und in strukturierte Form gebracht werden. Diese Struktur muss, um vom Rechner verstanden und angewandt zu werden, sehr einfach sein, während im Gegensatz dazu das menschliche Denken äußerst kompliziert und vernetzt ist, so dass eine direkte Abbildung der Gedankengänge nur unter erheblichen Vereinfachungen durchführbar ist.
Diese Simplifizierung ist in der Technik durchaus nichts Neues, da sie bei sämtlichen Modellen, die bereits lange vor dem Computerzeitalter aufgestellt wurden, angewandt wurde. Dabei beschränkt man sich jedoch im Gegensatz zu den Bereichen der Künstlichen Intelligenz auf begrenzte Gesetzmäßigkeiten, die mit Hilfe relativ weniger Parameter und unter Nichtberücksichtigung anderer Einflussfaktoren dargestellt werden können, wofür die Fallgeschwindigkeit ein einfaches Beispiel ist, da hierbei der Luftwiderstand und die Reibung der verschiedenen Körper in der üblicherweise verwendeten Berechnungsformel vernachlässigt werden [148].

Das menschliche Denk- und Wahrnehmungsvermögen ist so komplex und von so vielen Einflussgrößen geprägt, dass es auf unabsehbare Zeit nicht modelliert werden kann, zumal seine Arbeitsweise bis jetzt nur ansatzweise geklärt ist und verstanden werden kann. Versuche mit neuronalen Netzen, die die Verknüpfung einzelner Parameter durch Synapsen zu simulieren versuchen, stecken nach wie vor in den Kinderschuhen und beschränken sich auf sehr begrenzte Gebiete [149].

Wie aber bereits in Kapitel 5.5.2. dargestellt wurde, ist die Korrosion ein interdisziplinäres Gebiet, das fachübergreifendes Verständnis erfordert. Die Zahl ihrer Einflussgrößen ist dementsprechend so groß, dass ihr Verständnis sehr schwer ist. Schuld daran sind die nötigen Verknüpfungen zwischen den einzelnen Faktoren, deren Zusammenhang erkannt werden muss.
In der vorliegenden Arbeit wurde deswegen besonderer Wert auf diese Kohärenzen gelegt. Es wurde versucht, möglichst alle Einflussfaktoren zu sammeln und zu verknüpfen.

Ein Rechnersystem ist folglich nur so gut, wie die Systematik, auf der es aufgebaut ist. Das größte Problem der vorliegenden und aller ähnlichen Arbeiten ist somit das Problem der Systematisierung, da es sich bei der Korrosion nicht um einen abgegrenzten Bereich handelt, der sich auf ein bestimmtes Objekt bezieht, dessen Eigenheiten als Randbedingungen genommen werden können, wie beispielsweise bei der Korrosion in wasserdurchströmten Rohrleitungen. In diesem Fall kann man nämlich von Anfang an bestimmte Beschränkungen treffen und bestimmte Korrosionsarten, die sich aus der Geometrie der Rohre ergeben, genauer betrachten. Außerdem kann man bestimmte Einflussfaktoren wie zum Beispiel die Strömungsgeschwindigkeit eingehender untersuchen. Sowohl der Schadenarten- als auch der Schadenursachenbereich kann von vornherein eingeschränkt werden, so dass eine Befragung gezielter und auch eine genauere Ursachenangabe erfolgen kann, zudem das unterstützende Bildmaterial genau auf den Problembereich zugeschnitten ist und dem Gutachter damit die Beurteilung wesentlich erleichtert.
Zu dem gleichen Ergebnis, dass Expertensysteme nur bei scharf eingegrenzten Anwendungsgebieten erfolgreich eingesetzt werden können, sind bereits andere auf diesem Gebiet tätige Entwickler gelangt [60, 66, 129, 150, 151]. Darauf ist es auch zurückzuführen, dass, wie aus Kapitel 2.3.-2.4. ersichtlich ist, noch kein umfassendes Korrosionssystem entwickelt wurde.

Bei der Entwicklung des vorliegenden Modells musste also ein sehr breites Gebiet, das nur wenige Anhaltspunkte bietet, systematisiert werden, wobei die Anzahl der Fragen, die der Bearbeiter zu beantworten hat, um zu einer Lösung zu gelangen, relativ gering sein muss.
Dies wurde durch die Verwendung nahezu aller Möglichkeiten, die Stand der Technik sind, erreicht. Ein sehr wichtiges Beispiel ist das Verfahren des Ausschlusses (vgl. Kap. 5.5.1.2.).
Zur Wissensdarstellung wurden Relevanzbäume verwendet, die die Zusammenhänge der einzelnen Faktoren im Gegensatz zu Matrizen logisch aufzeigen. Durch die Übertragung dieses Modells auf ein methodisches Hilfsmittel, das an die PROSA angelehnt ist, wurde der Brückenschlag von einzelnen Methoden zur integrativen Schadenanalyse, die sowohl logisches Wissen als auch Methodik enthält, geschaffen.
Um dabei die Vereinfachungen des Modells möglichst gering zu halten, wurde die Wissensmodellierung mit einem hybriden System vorgenommen. Dabei wurden zur Abbildung der Realität Objekte verwendet, die durch Eigenschaften genauer definiert werden. Laut Neumann ist der objektorientierte Ansatz ein denkkompatibler Ansatz [152], womit er folglich für die Zwecke der Künstlichen Intelligenz sehr gut geeignet ist. Trotzdem mussten wie bei jedem Modell Vereinfachungen vorgenommen werden, die jedoch aufgrund der offenen Pro-

grammierweise, die eine leichte Erweiterung des Systems gewährleistet, einfach beseitigt werden können, was im Rahmen einer Folgearbeit vorgenommen werden kann.
Weiterhin ist es gelungen, die grundlegenden Bedingungen eines Expertensystems zu erfüllen, da das System fähig ist, Probleme zu lösen und logische Schlussfolgerungen zu ziehen, da es sich selbständig aus den Angaben des Anwenders einen Lösungsweg sucht..
Die Kombination dieser drei Punkte in Verbindung mit einer mächtigen Expertensystementwicklungsshell, die die Möglichkeit der dynamischen Oberflächen bietet, hat die Entwicklung einer relativ umfassenden und dennoch einfach zu handhabenden rechnergestützten Schadenanalyse ermöglicht.

Trotz dieser hervorragenden Mittel, die zum Aufbau eines Expertensystems zur Verfügung stehen, dürfen die auftretenden Probleme und die daraus folgenden Grenzen der Entwicklung einer rechnergestützten Schadenanalyse nicht vernachlässigt oder als gering erachtet werden. Sie treten bei jeder Systematisierung eines größeren Gebietes auf und sind deswegen von allgemeinem Interesse der Wissensmodellierung. Sie liegen in

- der Wissenssammlung
- der Wissensselektion
- der Wissensordnung.

Die Wissenssammlung erwies sich als äußerst kompliziert, da sie hauptsächlich, wie in Kapitel 3. ausgeführt wurde, auf einer ausführlichen Literaturstudie basiert. Diese Literaturstudie führte zu einem Grundsystem, das die wichtigsten Gesichtspunkte enthielt. Es wurde mit Hilfe von Experten in mehreren iterativen Schritten optimiert. Dieses Grundsystem wurde außerdem durch Simulationsversuche erweitert und vervollständigt.
Die Problematik der Wissenssammlung ist stark mit der der Wissensselektion gekoppelt, da bereits bei der Suche der einzelnen Wissensbestandteile vorentschieden werden muss, ob ein Faktum für das zukünftige Expertensystem relevant ist oder nicht. So gibt es zahlreiche Merkmale von Korrosionsarten und –mechanismen, die für bestimmte Einzelfälle eine hervorragende Beschreibung darstellen, aber für ein allgemeingültiges System nicht verwendet werden können, da sie nur unter ganz seltenen Umständen in bestimmten Anwendungsbereichen auftreten.
Außerdem muss zumindest bei einem Grundlagensystem eine Beschränkung des aufgenommenen Wissens vorgenommen werden, da sonst sehr schnell die Gefahr der Unübersichtlichkeit und damit des Scheiterns des Projektes droht. Deswegen ist es besser, sich am Anfang auf die wichtigen Faktoren zu beschränken, auf denen dann aufgebaut werden kann. Im Falle der Korrosion wurde eine Beschränkung auf un-/niedriglegierten und nichtrostenden Stahl getroffen, wobei aber keine Einschränkung im Sinne der bereits bestehenden Korrosionssysteme aus Kapitel 2.4. besteht, da das vorliegende System im Gegenteil so angelegt ist, dass es auf das gesamte Gebiet ausgedehnt werden kann.
Weiterhin muss das Wissen geordnet werden, wobei es sich um die Anordnung der einzelnen Wissensstücke zueinander handelt. Davon hängt es ab, wie effizient das System später arbeitet und wie viele Fragen ein Anwender stellen muss, um zu einem Ergebnis zu gelangen.

Daneben muss die Einordnung einzelner Wissensbestandteile beachtet werden, da zum Beispiel der Walzzunder bei der Schadenmechanismusanalyse gleichzeitig drei Hauptkomplexen zugeteilt werden kann, dem Oberflächenzustand, dem Einsatz und der Lieferung. Er darf jedoch nur einmal eingearbeitet werden, um Wiederholungen zu vermeiden. Diese Entscheidung kann nur von einem Experten getroffen werden.

Darauf ist es auch zurückzuführen, dass der behandelte Komplex der elektrochemischen Korrosion nicht in einem Expertensystem abgehandelt wurde, sondern eine Aufteilung in zwei Expertensysteme und eine Datenbank vorgenommen wurde. Diese Teilung führte zu einer Vereinfachung der einzelnen Gebiete, so dass eine vollständige Konzentration auf das jeweilige Ziel erreicht wurde, ohne dass Kompromisse bezüglich der Zielstellung der einzelnen Teilsysteme eingegangen werden mussten. Trotzdem wurden alle Hauptparameter aus Kap. 5.5.2 berücksichtigt.

Obwohl die Systematik dem Anwender viele mögliche Ursachen aufzeigt, kann sie dennoch kein Abbild der Realität geben, da dabei zu viele Parameter berücksichtigt werden müssten, die weder bauteil- noch werkstoffimmanent sind. Eine Rechnersystematik, die diese Einflussfaktoren alle in Betracht ziehen würde, wäre zu umfangreich und würde den Gutachter mehr behindern als ihm nützen, da er eine große Zahl Fragen beantworten müsste, die ihn mit großer Wahrscheinlichkeit doch nicht zu einem Ergebnis führen würden, da die Umwelteinflüsse so mannigfaltig und verschieden sind, dass sie nie auch nur annähernd vollständig rechnergestützt bearbeitet werden können. Dabei kommt in diesem Falle wieder das Problem der Assoziationsunfähigkeit der aktuellen und wahrscheinlich auch der folgenden Computergenerationen zum Tragen, weil anders als beim Menschen wirklich jeder Schaden genau eingegeben werden muss, selbst wenn er nur geringfügig von einem ähnlichen Schaden abweicht, da der Rechner keine selbständige Verbindung herstellen kann.

So kann an einem ganz einfachen Beispiel gezeigt werden, dass ein Expertensystem bei der Schadenursachefindung immer überfordert sein wird, da oft Gesichtspunkte auftreten, mit denen niemand rechnet und die somit auch niemals in eine rechnergestützte Schadenanalyse aufgenommen werden.
In einem etablierten Hotel kam es zu sehr schwerwiegenden Korrosionserscheinungen an den Waschbeckensyphons. Während die Materialkosten keine große Schadensumme ergaben, stellten die Folgeschäden eine erhebliche Belastung dar. Da die Schadenreihe nicht abriß, musste die Schadenursache herausgefunden werden. Dabei wurde festgestellt, dass die Schäden immer nur in bestimmten Trakten des Hotels auftraten, aber ansonsten keine Regelmäßigkeit hatten. Als Schadenart wurde Säurekorrosion festgestellt. Weiterhin wurden Wasseruntersuchungen vorgenommen, die jedoch ergaben, dass das Wasser einwandfrei war. Auch am verwendeten Werkstoff konnten keine Abweichungen von der geforderten Qualität festgestellt werden. Trotzdem alle Syphons ausgewechselt wurden, traten immer wieder Schadenfälle auf [72].
Das Ganze wurde erst gelöst, nachdem man von der rein systemtechnischen Betrachtung wegging und die menschliche Komponente betrachtete. Es handelte sich nämlich ausnahms-

los um Zimmer, die keine Toilette hatten und meist von Handelsreisenden genutzt wurden. Daraus ergab sich die einfache Lösung, dass sie nachts ihre Zimmer nicht verlassen wollten und deswegen in das Waschbecken uriniert hatten. Da es sich im Falle des Urins um ein äußerst aggressives Medium handelt, kam es innerhalb kürzester Zeit zum Wanddurchbruch aufgrund von Korrosion [72].

Dieses Beispiel zeigt, dass nicht alle Möglichkeiten, die Schadenursachen auslösen, in ein wissensbasiertes System aufgenommen werden können. Man kann nur grundlegende Systeme implementieren wie zum Beispiel die Möglichkeit der Spaltbildung oder die Problematik der Ablagerungen. Dabei können zwar die Ablagerungen noch exakter definiert werden, aber eine genauere Klärung, woher die Ablagerungen kommen, übersteigt bei weitem die Möglichkeiten eines Expertensystems, wenn es einen sinnvollen Umfang einnehmen und den Gutachter mit einem vertretbaren Aufwand zum Ergebnis führen soll.
Eine Vollständigkeit ist jedoch auch nicht nötig, wenn das System die grundlegenden Schadenursachemöglichkeiten enthält und verknüpft, so dass der Gutachter mit geringem Abstraktionsaufwand seinen vorliegenden Schaden auf einen Schadenweg, der in der rechnergestützten Schadenanalyse enthalten ist, zurückführen und somit selbsttätig ohne große Anstrengung ihren Einsatzbereich stark erweitern kann.
Auf diese Weise wurde versucht, die KI-Lücke (vgl. Kap. 2.2.3.), die das Auseinanderklaffen der Realität und ihrer Rechnerabbildung bezeichnet, sehr klein zu halten.
Eine Vollständigkeit ist nicht nur unnötig, sondern auch unmöglich, da es das Problem aller wissensverarbeitenden Systeme ist, dass mit zunehmender Detailliertheit der Systematik Aufwand und Zeit, die zu ihrer Erstellung und Pflege notwendig sind, überproportional wachsen.
Dementsprechend ist es aufgrund eigener Erfahrungen des Autors besser, dem Anwender die grundsätzliche Schadenursache zu nennen und ihm dann die genauen Vorortbedingungen, die schließlich zur Auslösung des Schadens geführt haben, selbst klären zu lassen, womit ein vertretbarer Mittelweg gefunden wurde.
Eine Ausnahme von dieser Regel bilden in gewissen Grenzen geschlossene Systeme, in denen genau bekannt ist, welche Einflüsse auftreten. Ein Beispiel dafür ist ein Motorschadendiagnosesystem, dessen Prototyp für eine große Automobilfirma im Zusammenhang mit dieser Arbeit mit einer ähnlichen Vorgehensweise entwickelt wurde. Ein Teil davon bezog sich auf Ventilschäden, wobei man anhand der Erscheinungsbilder, die von Spezialisten beschrieben wurden, genau feststellen konnte, ob es sich um einen Motorschaden aufgrund eines Qualitätsmangels, den die Firma zu vertreten hat, oder um einen Überdrehschaden aufgrund einer falschen Fahrbedingung, die durch den Fahrzeugnutzer hervorgerufen wurde, handelt.
Da bei dem vorliegenden System der Korrosion nicht ähnlich definierte Randbedingungen vorliegen, konnten nur allgemeine Ursachen verwirklicht werden. Beispielsweise ist feststellbar, ob eine interkristalline Korrosion aufgrund einer langanhaltenden Glühung, einer falschen Werkstoffwahl oder einer kurzzeitigen Erwärmung und darauf folgender langsamer Abkühlung, wie es beim Schweißen der Fall ist, aufgetreten ist.

Diese Angabe des grundlegenden Schadenmechanismus kann sich jedoch schon in von Normalsituationen abweichenden Schäden als schwierig erweisen. Zum Beispiel, wenn man mehrere Schadenerscheinungen am gleichen Bauteil hat, die auf verschiedene Korrosionsarten deuten und von denen man nicht weiß, wie und ob sie zusammenpassen oder welche zum Primär- und welche zum Sekundärschaden gehören. Die Klärung solcher Zusammenhänge teilt sich in so viele Fälle auf, daß sie nicht mehr in ein System eingegeben werden können. Deswegen muss man sich bei überlagerten Schäden auf einfache Zusammenhänge beschränken, wie zum Beispiel, dass der Spannungsrisskorrosion eine Lochkorrosion überlagert sein kann.

Mit dieser Arbeit wurde aufgrund der Vorgehensweise, die Methodik eines menschlichen Schadengutachters zu systematisieren und abzubilden, der generelle Weg zur rechnergestützten Schadenanalyse eröffnet. Sowohl das zugrunde liegende Gedankenmodell als auch das beispielhafte Rechnermodell sind leicht ausbaubar, was sich nicht nur auf die Korrosion, sondern auch auf alle anderen Bereiche der Schadenanalyse wie mechanische, thermische und tribologische Schäden bezieht. Dabei wurde Wert darauf gelegt, dass das theoretische Modell unabhängig von der Rechnersystematik benutzt werden kann. Dies erst ermöglicht dem interessierten Nutzer ein selbständiges Verständnis der Korrosionszusammenhänge, da bei dieser Systematisierung von den Einflussgrößen und nicht von den Schadenarten ausgegangen wurde, so dass sich der Anwender völlig auf die Korrelation der Parameter konzentrieren und somit das System, das die Korrosion besitzt, leichter verstehen kann.
Anhand dieses Grundgerüstes lassen sich auch weitere Korrosionsarten, die weniger verbreitet und deswegen im vorliegenden System nicht enthalten sind, schneller erfassen und einordnen. Der Anwender kann sich anhand dieses Grundwissens der Korrosionszusammenhänge mit Hilfe seiner Assoziationsfähigkeit weitere Schadenursachen erschließen. Somit liefert die Systematik eine deutliche Verständniserleichterung. Das bedeutet konkret, dass sich der unerfahrene Anwender nicht mehr selbst eine Systematik gedanklich zurechtlegen muss, sondern dass er bereits darauf aufbauen kann und sich das Gebiet dementsprechend schneller aneignen kann.

Bei der vorliegenden Arbeit handelt es sich um ein Grundsystem, das im Laufe der Zeit je nach speziellem Bedarf noch ausgebaut werden kann. Dabei muss aber genau darauf geachtet werden, dass die neuen Eingaben immer im Sinne der Systematik sind und sich nicht in Einzelschäden verlaufen, die nur selten auftreten. Es muss sich um weitere grundlegende Ursachen handeln, die eine Korrosionsart begründen können. Dabei können auch weitere Einflussgrößen, die in dieser Arbeit zurückgestellt wurden, um die grundlegende Struktur nicht zu überlasten, berücksichtigt werden. Beispielsweise könnte sich eine weitere Arbeit mit dem quantitativen Einfluss von Temperatur und Sauerstoffgehalt auf die Korrosion beschäftigen. Außerdem könnte die Wirkung einzelner Inhibitoren und vor allem das Zusammenspiel mehrerer verschiedener Inhibitoren bearbeitet und systematisiert werden. Ein weiteres Aufgabengebiet wäre die Ausdehnung auf andere Werkstoffe.

Deswegen sollen als Ausblick Möglichkeiten betrachtet werden, die die Rechnerunterstützung der Schadenanalyse noch komfortabler und sinnvoller machen können, da es zweifellos richtig ist, die bereits erzielten Erfolge in der Schadenbearbeitung und das dabei gesammelte Wissen mit Hilfe eines leicht nutzbaren und weit verbreiteten Mediums in die Industrie zu transferieren, um einen hohen Qualitätsstandard der Produkte gewährleisten zu können.
Nachdem die Systematisierung einmal vorgenommen worden ist, kann mit relativ wenig Aufwand eine Anpassung für beliebige Zwecke vorgenommen werden. Ein Beispiel dafür ist das bereits erwähnte Motorschadendiagnosesystem. Dabei besteht die Hauptarbeit in der Systematisierung, die danach für verschiedene Ziele verändert werden kann. Es kann beispielsweise als Lernsystem abgewandelt werden. Andererseits können Teilmodule eines Fachgebietes geschaffen werden, die dann einzeln an die Abteilungen verteilt werden, für die sie relevant sind. Dies führt zu einer Entkoppelung von unnötigen Wissensbereichen.

Eine Ausblicksmöglichkeit ist der Einsatz der in dieser Arbeit entwickelten Systematik auf andere Gebiete, die für diese Art der Wissensaufbereitung geeignet sind. Beispiele dafür sind bauteilbezogene Bereiche wie die Diagnose von Schäden an Motoren oder Produktionsstraßen, bei denen es sich um relativ geschlossene Systeme handelt, in denen die Umwelteinflüsse gut erfassbar sind. In diesem Zusammenhang stellt sich allerdings weniger ein System-, sondern eher ein Kapazitätsproblem, da es sich bei diesen Gebieten um so umfangreiche Gebiete handelt, dass sie nicht von einem Wissensingenieur allein abgehandelt werden können. Um einen derartigen Bereich systematisch aufbereiten zu können, benötigt man eine Gruppe motivierter und entsprechend geschulter Mitarbeiter und zusätzlich eine Vielzahl von Experten, die sich die Zeit nehmen und nehmen können, um ihr Wissen für ein Expertensystem „spenden“ zu können.
Eine derartige Wissenserfassung und Aufbereitung ist immer sinnvoll, egal ob sie dann mit Hilfe eines neuronalen Netzes oder eines Regelnetzes auf dem Rechner implementiert wird, da, wie bereits mehrfach erwähnt, die Wissensgewinnung und Strukturierung das größte Problem dessen darstellt, was heutzutage als Künstliche Intelligenz gilt.
Ein Beispiel für den derartigen Einsatz ist das Expertensystem, das bei DaimlerChrysler in Untertürkheim entwickelt wurde. Dabei wurden die Erkenntnisse, die im Rahmen der Fehlerdiagnose zur Qualitätssicherung in der Motorenproduktion gemacht wurden, gesammelt und strukturiert, um die mit der Fehlerbehebung betrauten Nacharbeiter zu unterstützen. Die zugrunde liegende Systematik beruht auf der in der vorliegenden Arbeit aufgestellten Vorgehens und Strukturierungsweise [153].

Um jedoch wirkliche künstliche Intelligenz schaffen zu können, ist es unvermeidlich, den Weg der neuronalen Netze weiter zu verfolgen, da sie den menschlichen Denkstrukturen erheblich näher kommen als wissensbasierte Systeme auf der Basis von Produktionsregeln. Selbst die Objektorientierung ist dabei kein Fortschritt in Richtung der Wissensverknüpfung, sondern nur in der einfacheren Wiedergabe der realen Objekte und ihren Verhältnissen untereinander.
Neuronale Netze bestehen ähnlich wie lebende Organismen aus Synapsen. Das sind kleine Schaltzentralen, in denen die einfließenden Informationen verarbeitet und gewichtet werden

[154]. Solche Netze sind lernfähig und können auch nichtlineare Zusammenhänge abbilden. Die Lernfähigkeit zeichnet sie gegenüber Expertensystemen aus, wobei hier gilt, dass als Basis dafür möglichst viele Datensätze von gelungenen und fehlgelaufenen Prozessen vorhanden sein müssen, damit sie trainieren können, da neuronale Netze wie Menschen nur durch Wiederholen von Handlungsabläufen lernen [155].
Momentan stellen sie jedoch noch keine Konkurrenz zu den Expertensystemen dar, da deren Technologie weiter entwickelt ist und somit bereits heute funktionierende Systeme erstellt werden können, während sich neuronale Netze immer noch hauptsächlich im Entwicklungsstadium befinden.

Parallel zu den neuronalen Netzen schreitet die Entwicklung von Bilderkennungsgeräten voran, so dass man in absehbarer Zeit so weit sein wird, dass diese beiden Komponenten im Zusammenspiel Schäden erkennen können [11]. Dabei werden dem System charakteristische Bilder eines Schadens sowie ihre Erklärung übergeben. Bei einem neuen Schaden werden anhand eingescannter Bilder die spezifischen Merkmale erkannt, woraus folgend eine Hypothese der Schadenart geschlossen werden kann. Solche Systeme werden sogar Selbstlerneigenschaften besitzen, obwohl trotz aller Fortschritte auch hier nicht übersehen werden darf, dass eine derartige Untersuchungsmethode ebenfalls nicht fähig ist, die Umwelteinflüsse zu erfassen und somit die Schadenursache festzustellen. Außerdem bleibt auch hier die Problematik der Systematisierung und Nichtassoziationsfähigkeit von Rechnern, weswegen dem System zuerst genau „gelernt“ werden muss, wie es einzelne Kennzeichen aus dem Schadenbild herausfinden kann, da sie nicht wie die enthaltenen Muster aussehen und auch nicht den gleichen Maßstab haben werden. Somit ist entweder der Aufwand sehr hoch oder es müssen entsprechend umfangreiche Einschränkungen und Vorbearbeitungen des zu untersuchenden Schadenbildes vorgenommen werden.

Zur sinnvollen Unterstützung des Schadengutachters ist es das Beste, die in dieser Arbeit erstellte rechnergestützte Schadenanalyse zu erweitern. Das einfachste und beste Mittel ist die Implementation von Schadenfotos, die genau die betreffenden Kennzeichen einer Korrosionsart enthalten. Dieses Vorgehen wurde bereits angewandt und soll noch verstärkt werden, so dass auch hier wieder mehr auf die Interpretationsfähigkeit des Menschen vertraut wird.

Im Gesamtbereich der rechnergestützten Schadenanalyse wurde also ein Anfang gemacht. Ihr Durchbruch hängt davon ab, wie sie in weiteren Arbeiten ergänzt und vorangetrieben wird.
Trotzdem ist und bleibt die Schadenanalyse und alle ähnlich komplexen Fachgebiete eine Domäne des Menschen, da kein Rechnersystem zu einer integrativen Betrachtung fähig ist, die nötig ist, um einen unbekannten Schaden zu erfassen und mit den bekannten Kennzeichen zu vergleichen.

8. Kritische Wertung des Systems

Das System versucht mit Hilfe eines neuen Modellierungsansatzes, der auf den bisher angewandten Methoden und Systemen der Schadenbearbeitung aufbaut, die Schadenanalyse im Bereich der Korrosion mit dem Rechner zu ermöglichen.
Es hat sich gezeigt, dass die Korrosionsschadenanalyse grundsätzlich für den Rechnereinsatz geeignet ist (vgl. Kap. 3), und dass es möglich ist, ein Korrosionsmodell zu erstellen, mit dem einfache Schäden bearbeitbar sind. Es hat sich jedoch auch herausgestellt, dass zur Nutzung des Systems ein Anwender nötig ist, der fähig ist, kombinierte Schäden so aufzulösen, dass er die einzelnen Schäden wieder mit Hilfe des Expertensystems bearbeiten kann. Dennoch lässt sich feststellen, dass ein Anfang im Bereich der rechnergestützten Schadenanalyse gemacht wurde, auf dessen Modell aufbauend nun Verbesserungen und Erweiterungen vorgenommen werden können. Die vorgenommene Einteilung stellt nur eine Möglichkeit dar, die im Expertengespräch als sinnvoll festgestellt wurde. Damit wurde jedoch die Zielstellung erreicht, nämlich zu überprüfen, ob es möglich ist, eine rechnergestützte Schadenanalyse im Bereich der Korrosion zu erstellen, wobei jedoch auch klar die Grenzen erkannt werden müssen, die aufgrund der derzeit bekannten Möglichkeiten der Wissensrepräsentation bestehen.

Die Möglichkeiten zur Weiterentwicklung wurden durch konsequente offene Modellierung und Programmierung erreicht. Um noch einen offeneren Programmiercode zu erreichen, wurden bereits erste Versuche unternommen, das Modell unabhängig von der Expertensystementwicklungsshell Smart Elements auf der Programmiersprache Visual C++ zu implementieren. Da es sich dabei ebenfalls um eine objektorientierte Sprache handelt, konnte eine Übertragung des Modells relativ leicht vorgenommen werden.

Das Potential der rechnergestützten Schadenanalyse ist somit noch bei weitem nicht ausgeschöpft, womit sie durch eine geeignete Weiterentwicklung zu einem wichtigen Hilfsmittel für den Schadengutachter werden kann. Bei konsequenter Anwendung des Systems durch die Anwender könnten die meisten Fehler, die in Kap. 2.1.3. erläutert wurden, vermieden werden.

Dabei liegt eine besondere Bedeutung in der neuen Lehrmöglichkeit der Korrosion, da das zugrunde liegende Gedankenmodell die Korrosion so in ihre Grundbestandteile aufspaltet, dass ihre Grundzüge besser verstanden und gelernt werden können. Es findet nämlich eine Abstraktion der Korrosion auf alle grundlegenden Schadenmöglichkeiten statt, deren Bestandteile danach wieder zu allen möglichen Schadenursachen kombiniert werden können und somit deren Ableitung zulässt.

9. Zusammenfassung

Das Ziel war, die Grenzen und Möglichkeiten der rechnergestützten Schadenanalyse zu untersuchen. Dazu sollte beispielhaft ein Korrosionssystem entwickelt werden, das den Schadengutachter bei der Arbeit unterstützt und ihm die Schadenbearbeitung nicht nur komfortabler macht, sondern ihm mit logischen Schlussfolgerungen sowohl die Schadenart als auch die –ursache angibt.
Dazu musste eine neue Systematik entwickelt werden. Sie setzt bei den einzelnen Einflussfaktoren der Korrosion an und teilt sie in die großen Bereiche ein, in denen Fehler auftreten können, die zu Korrosionsschäden führen. Es handelt sich dabei um die mechanische Belastung, die Einsatz- und Bearbeitungsbedingungen und den Lieferzustand. Mit Hilfe dieser Methode kann sowohl die Schadenart als auch die –ursache herausgefunden werden.
Zur Gegenprobe oder auch zur alleinigen Verwendung wurde eine weitere Systematik entworfen, die zur Schadenanalyse mit Hilfe der Kennzeichen von Schadenarten geeignet ist. Sie überprüft anhand der gängigen Untersuchungsmethoden wie Makroskopie, Lichtmikroskopie, Elektronenmikroskopie und Analytik das Schadenbild und schließt daraus auf eine Schadenart.
Um diese Systematiken zu erstellen, wurden neben Expertenbefragungen und einer Literaturstudie zahlreiche Simulationsversuche durchgeführt, um den praktischen Wert der Arbeit schon während ihrer Erstellung unter Beweis zu stellen.

Nachdem diese grundlegenden Gedankenmodelle erstellt waren, wurden sie mit Hilfe einer Expertensystementwicklungsshell in eine Rechnerform übersetzt. Dabei wurde zur Wissensmodellierung eine hybride Shell verwendet, um die Vorteile der einfachen Realitätsabbildung durch die Objektorientierung und die Vorteile der sehr einfachen Steuerung durch Produktionsregeln gleichzeitig zu nutzen.
Diese beiden Expertensysteme enthalten zusammen ca. 400 Regeln.

Um die Schadenanalyse zu vervollständigen, wurde weiterhin eine Datenbank implementiert, die die Beständigkeit von Werkstoffen in bestimmten Medien behandelt. Dabei handelt es sich jedoch nicht um eine besondere Neuerung, sondern nur um die Darstellung einer einfachen Möglichkeit, eine solche Datenbank aufzubauen. Beispielhaft wurden für nichtrostende Stähle mit und ohne Molybdängehalt zahlreiche Medien eingegeben, so dass die Datenbank ca. 2500 Regeln besitzt.

10. Literaturverzeichnis

[1] Meckelburg, E.: Korrosionsverhalten von Werkstoffen: eine tabellarische Übersicht. Düsseldorf: VDI, 1990

[2] Broomfield, J. P.: Corrosion of steel in concrete. E & F Spon, 1. Auflage, 1997

[3] Parkins, R. N.: Corrosion processes, London, Applied Science Publisher Ltd., 1. Auflage, 1982

[4] Fischer, W.; Fohmann, L.; Mader, W.: Expertensysteme für den Korrosionsschutz. In: Werkstoffe und Korrosion 38, VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim, 1987, S. 375-379

[5] Broichhausen, J.: Schadenskunde, Analyse und Vermeidung von Schäden in Konstruktion, Fertigung und Betrieb. Carl Hanser München, Wien, 1. Auflage, 1985

[6] Lange, G.: Systematische Beurteilung technischer Schadensfälle. Deutsche Gesellschaft für Metallkunde e. V., 3. Auflage, 1992

[7] Schmitt-Thomas, Kh. G.: Rechnergestützte Schaden- und Schwachstellenanalyse. In: Schweizerische Zeitschrift für Materialtechnik, Separatdruck aus Swiss Materials 2 (1990), Nr. 3a, 49-58

[8] Schmitt-Thomas, Kh. G; Siede, R.: Technik und Methode der Schadenanalyse. VDI, Düsseldorf, 1. Auflage, 1989

[9] Siede, R.: Systematik der Schadensanalyse. In: Bartz, Wilfried: Schäden an geschmierten Maschinenelementen, Kapitel 12, Expert, Böblingen, 2. Auflage, 1992

[10] Neese, J.: Methodik einer wissensbasierten Schadenanalyse am Beispiel von Wälzlagern. Diss. am Lehrstuhl für Konstruktion im Maschinenbau, TU München, 1991

[11] Diener, R.: Einsatz von Expertensystemen in der Schadenanalyse. Diplomarbeit am Lehrstuhl für Angewandte Materialwissenschaften, TU-München, April 1997

[12] DIN 25 419: Ereignisablaufanalyse; Verfahren, graphische Symbole und Auswertung. Hrsg.: Deutscher Normenausschuß, Ausg. November 1985

[13] DIN 25 424 Teil 1: Fehlerbaumanalyse; Methode und Bildzeichen. Hrsg.: Deutscher Normenausschuß, Ausg. September 1981

[14] DIN 25 424 Teil 2: Fehlerbaumanalyse; Handrechenverfahren zur Auswertung eines Fehlerbaumes. Hrsg.: Deutscher Normenausschuß, Ausg. April 1990

[15] Theiss, G.: Systemtechnischer Ansatz für die Entwicklung von Expertensystemen zur Überwachung und Diagnose automatisierter Anlagen am Beispiel einer Spiegelofen-Kristallzuchtanlage. Diss. an der Fakultät für Informatik der Universität Karlsruhe, 1995

[16] DIN 25 448: Ausfalleffektanalyse; Fehler-Möglichkeits- und Einflussanalyse. Hrsg.: Deutscher Normenausschuß, Ausg. Mai 1990

[17] Schönfeld, R.; Leicht, R.; Simon, R.; Schmitt-Thomas, Kh. G.: DV-gestützte Schadensvorsorge bei Bauteilen. In: VDI-Bericht 902: Bauteilschäden, Ursachen und Verhütung, VDI, Düsseldorf 1990

[18] Schmitt-Thomas, Kh. G.: PROSA-Dokumentationssystem. IST-Ingenieurdienst für Sichere Technik, München. 1986. In: Hochschulpraktikum Schadensanalyse 23.

bis 25. Oktober 1985 VDI Gesellschaft Werkstofftechnik; Lehrstuhl für Metallurgie und Metallkunde der TU München

[19] Kepner, C.; Tregoe, B: Management-Entscheidungen vorbereiten und richtig treffen. Moderne Industrie, München, 1. Auflage, 1967

[20] Richter, M.: Prinzipien der künstlichen Intelligenz. Teubner, Stuttgart, 2. Auflage, 1992

[21] Lunze, J.: Künstliche Intelligenz für Ingenieure. Band 2: Technische Anwendungen, Oldenburg, München Wien, 1. Auflage, 1995

[22] VDI-Richtlinien: VDI 5006 E: Bürokommunikation; Expertensysteme in betriebswirtschaftlichen Anwendungen. VDI, Düsseldorf, September 1992

[23] Laczkovich, R. R.: Expertensysteme zur technischen Fehlerdiagnose: eine betriebswirtschaftlich orientierte Analyse ihrer Leistungs- und Gestaltungspotentiale. Erich Schmidt, Berlin, 1. Auflage, 1990

[24] Nebendahl, D.: Expertensysteme: Einführung in Technik und Anwendungen. Siemens Aktiengesellschaft, Berlin und München, 1987

[25] Gevarter, W.: Intelligente Maschinen; Einführung in die künstliche Intelligenz und Robotik. VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim, 1. Auflage, 1985

[26] Puppe, F.: Einführung in Expertensysteme. Studienreihe Informatik, Springer, Berlin, 1. Auflage, 1988

[27] Hoff, H. (Hrsg.); Zinn, H.-J.; Kurz, E.: Marktspiegel Expertensysteme auf dem Prüfstand: der Einsatz von Shells, Tools und Expertensystemen im Produktionsbereich. TÜV Rheinland, Köln, 1. Auflage, 1990

[28] Hanauer, J.: Rechnergestützte Bruchbeurteilung in der Schadenanalyse. Diplomarbeit am Lehrstuhl für Werkstoffe im Maschinenbau, TU München, März 1985

[29] Glunk, F. R.: Computer und Roboter. Loewe, Bindlach, 1. Auflage, 1993

[30] Tolle, H.: Menschliche Fähigkeiten sind noch nicht erreicht. In: Markt&Technik, Nr. 29 vom 14.07.95

[31] Hartmann, D.; Lehner, K.: Technische Expertensysteme, Grundlagen; Programmiersprachen, Anwendungen. Springer, Berlin Heidelberg, 1. Auflage, 1990

[32] Jüngst, E. W.: KI-Forschung bei Daimler-Benz AG. In: Sonderheft zur KI, in KI ´94, S. 71-74

[33] Seraphin, M.: Neuronale Netze und Fuzzy-Logik; Verknüpfung der Verfahren, Anwendungen, Vor- und Nachteile, Simulationsprogramm. Franzis, München, 1. Auflage, 1994

[34] Brause, R.: Neuronale Netze: Eine Einführung in die Neuroinformatik. Teubner, Stuttgart, 2. Auflage, 1995

[35] Mechler, B.: Intelligente Informationssysteme: Fuzzy Logic und Neuronale Systeme zur Unterstützung von Managemententscheidungen. Addison Wesley, Bonn Paris, 1. Auflage, 1994

[36] Fiedler, U.: Expertensysteme in der technischen Diagnostik. Technik GmbH, Berlin, 1. Auflage, 1990

[37] Bechtolsheim, M.; Schweichhart, K.; Winand, U.: Expertensystemwerkzeuge, Produkte, Aufbau, Auswahl. Vieweg, 1. Auflage, 1991

[38] Stief, W.: Ein Beitrag zur Wissensmodellierung bei technischen Diagnose- Expertensystemen. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 10, Nr. 166, VDI, Düsseldorf, 1991

[39] Harmon, P.; King, D.: Expertensysteme in der Praxis. Oldenburg, München Wien, 3. Auflage, 1989

[40] Altenkrüger, D.: Wissensdarstellung für Expertensysteme. BI Wissenschaftsverlag, Zürich, 1. Auflage, 1987

[41] Beetz, M.: Eine Wissensrepräsentation für Kontrollwissen in regelbasierten Systemen. In: Helmut Balzert, Gerd Heyer (Hrsg.): Expertensysteme ´87. Konzepte und Werkzeuge, Stuttgart 1987, S. 88-101

[42] NEXPERT OBJECT, Version 3.0, Knowledge Design; Functional Description. NEURON DATA, INC., Palo Alto, California, 1993

[43] Altenkrüger, D.: Wissensbasierte Systeme; Architektur, Entwicklung, Echtzeitanwendungen. Vieweg, Braunschweig/Wiesbaden, 1. Auflage, 1992

[44] Specht, D.: Wissensbasierte Systeme im Produktionsbetrieb. Hanser, München Wien, 1. Auflage, 1989

[45] Jackson, P.: Expertensysteme; Eine Einführung. Addison-Wesley, Bonn, 1. Auflage, 1987

[46] Follner, C.: Entwicklung eines wissensbasierten Diagnosesystems für flexible Produktionszellen. Diplomarbeit, TU München, Institut für Informatik, 1993

[47] Nilsson, N.: Priciples of Artificial Intelligence. Springer, Berlin Heidelberg, 1. Auflage, 1982

[48] Curth, M.: Entwicklung von Expertensystemen. Carl Hanser, München, Wien, 1991

[49] Rich, E.: KI-Einführung und Anwendungen. McGraw-Hill Book Company GmbH, Hamburg, 1. Auflage, 1988

[50] Kassera, W.: Turbo Pascal 7.0 - Das Kompendium, Kapitel 15: Objektorientiertes Programmieren. Markt &Technik, München, 1. Auflage, 1993, S. 397ff.

[51] Harmon, P.; Maus, R.; Morrissey, W.: Expertensysteme: Werkzeuge und Anwendungen. Oldenburg München Wien, 1. Auflage, 1989

[52] Grosch, J.: Schadenskunde im Maschinenbau. expert, Böblingen 1990

[53] Baumann, K.: Korrosionsschutz für Metalle: Anleitung und Auswahl. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1. Auflage, 1988

[54] Mörbe, K.; Morenz, W.; Pohlmann, H.-W.; Werner, H.: Praktischer Korrosionsschutz. Springer, New York, Erweiterter Nachdruck der 2. Auflage, 1987

[55] Gespräch mit Klaiß, R., TÜV, 31.09.96

[56] Wranglen, G.: Korrosion und Korrosionsschutz. Springer-, Berlin, Heidelberg 1985

[57] Tödt, F.: Metallkorrosion. Walter de Gruyter & Co., Berlin, 2. Auflage, 1958

[58] DIN 50 930 Teile 1-5: Korrosion metallischer Werkstoffe im Inneren von Rohrleitungen, Behältern und Apparaten bei Korrosionsbelastung durch Wässer. Hrsg.: Deutscher Normenausschuss, Ausg. Februar 1993

[59] VDI-Richtlinien: VDI 3822, Blatt 3: Schadensanalyse: Schäden durch Korrosion in wässrigen Medien. VDI, Düsseldorf, Februar 1984

[60] Eckermann, R.; Hatzinasios, A.: Coris - Ein computergestütztes Korrosionsinformationssystem: Ein Überblick. In: Werkstoffe und Korrosion, Band 44, S. 398-401, VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim, 1993

[61] DECHEMA: Informationssysteme, Datenbanken. Schön & Wetzel GmbH, Frankfurt am Main, 1994

[62] Gervens, Th.; Krohn-Huppertz, R.; Schlagner, W.: Coris: Korrosionsdatenbank. In: Werkstoffe und Korrosion 44, VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim, 1993, S. 402-409

[63] Sass, R.; Eckermann, R.: Die Versorgung von Coris mit Stoffdaten. In: Werkstoffe und Korrosion 44, VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim, 1993, S. 416-419

[64] Kirchheiner, R.; Kowalski, P.; Hartung, T.: Werkstoff-Datenbank. In: Werkstoffe und Korrosion 44, VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim, 1993, S. 410-415

[65] Gau, B. P.; Hatzinasios, A.: Coris: Literaturdatenbank. In: Werkstoffe und Korrosion 44, VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim, 1993, S. 431-433

[66] Hatzinasios, A.: Ein Expertensystem zur Auswahl von Werkstoffen für schwefelsaure Medien in Coris. In: Werkstoffe und Korrosion 44, VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim, 1993, S. 420-425

[67] Gunia, H.; Gervens, T.; Schlagner, W.:Coris: Wissensbasiertes System zur Lochkorrosion. In: Werkstoffe und Korrosion 44, VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim, 1993, S. 426-430

[68] Fischer, W.: Corros: Ein Expertensystem für die Korrosionsschutztechnik; Können Expertensysteme die Nutzung von Normen und technischen Regeln erleichtern und unterstützen?. In: Fischer, W. (Hrsg.): Korrosionsschutz durch Information und Normung, Schriftenreihe der Arbeitsgemeinschaft Korrosion e.V., Irene Kuron, Bonn, 1. Auflage, 1988

[69] Mertens, P.; Borkowski, V.; Geis, W.: Betriebliche Expertensystem-Anwendungen, Eine Materialsammlung. Springer, Berlin, Heidelberg New York, 1989

[70] Boag, W. A.; Reiser D. B.; Sprowls, D. O.; Rychener, M. D.: A Knowledge-Based System for Diagnosis of Stress Corrosion. In: Artificial Intelligence Applications in Materials Science, Metallurgical Society, Inc., Pennsylvania, 1986

[71] Gespräche mit Wendler-Kalsch, E., Institut für Werkstoffwissenschaften (Korrosion- und Oberflächentechnik), Universität Erlangen-Nürnberg

[72] Gespräche mit Simon, R., BMW AG

[73] Gespräche mit Leistikow, S., Kernforschungszentrum Karlsruhe

[74] Schmid, U.: Systematik der Korrosion im Maschinenbau. Diplomarbeit am Lehrstuhl für Angewandte Materialwissenschaften, TU München, Dezember 1996

[75] Schäuble, R.: Korrosionen in der Getränkeindustrie: Ursache – Vorsorge – Verhinderung – Sanierung. Deutscher Brauer-Bund e. V., Hans Carl, Bonn und Nürnberg, 1987

[76] Schmitt-Thomas, Kh. G.: Metallkunde für das Maschinenwesen. Band II, Springer, Berlin Heidelberg, 2. Auflage, 1989

[77] Oelsner, G.: Grundlagen der atmosphärischen Korrosion. In: Korrosion und Korrosionsschutz metallischer Werkstoffe im Hoch- und Ingenieurbau, 2. Korrosionum,

Stahleisen mbH, Düsseldorf, 1976

[78] Gräfen, H.: unveröffentlichte Aufzeichnungen

[79] Kaesche H.: Die Korrosion der Metalle. Springer, Berlin, 3. Auflage, 1990

[80] Strehblow, H. H.: Breakdown of passivity and localized corrosion: Theoretical concepts and fundamental experimental results. In: Werkstoffe und Korrosion 35, Chemie GmbH, 1984, S. 437-448

[81] Gräfen, H.: Korrosion verstehen – Korrosionsschäden vermeiden, Band 1, Verlag Irene Kuron, Bonn, 1994

[82] Edelstahl-Vereinigung e.V.: Nichtrostende Stähle. Stahleisen mbH, Düsseldorf, 2. Auflage, 1989

[83] Gräfen, H.: Schäden durch elektrolytisch-korrosive Beanspruchung. In: Tagungsband Hochschulpraktikum Schadenanalyse vom Lehrstuhl für Metallurgie und Metallkunde, TU München, 1985

[84] Bargel, H.-J.; Schulze, G.: Werkstoffkunde. VDI, 5. Auflage, Düsseldorf, 1988

[85] Barton, K.: Schutz gegen atmosphärische Korrosion, Chemie GmbH, Weinheim/Bergstr., 1. Auflage, 1973

[86] Gräfen, H.: Die Praxis des Korrosionsschutzes. expert, Grafenau/Württ. 1981

[87] Heitz, E.; Henkhaus, R.; Rahmel, A.: Corrosions Science An Experimental Approach, Ellis Horwood Limited, Chichester, 1992

[88] Allianz: Das Gesicht des Bruches metallischer Werkstoffe. Allianz Versicherungs-AG, München und Berlin, 1. Auflage

[89] Seidel, W.: Werkstofftechnik: Werkstoffe - Eigenschaften - Prüfung – Anwendung. Hanser, München, Wien, 2. Auflage, 1993

[90] Lohmeyer, S.: Edelstahl. expert, Ehningen bei Böblingen, 1. Auflage, 1993

[91] Sauer, R.: Austenitische und austenitisch-ferritische Stähle. In: Werkstoffkunde der gebräuchlichen Stähle, Entwicklung der Stahlsorten, ihre Vereinheitlichung und Normung. Teil 2, Stahleisen, Düsseldorf, 1977

[92] Verein Deutscher Eisenhüttenleute: Prüfung und Untersuchung der Korrosionsbeständigkeit von Stählen, Stahleisen, Düsseldorf, 1973

[93] Herbsleb, G.: Korrosionsschutz von Stahl, Stahleisen, Düsseldorf, 1977

[94] Laska, R.: Werkstoffkunde für Ingenieure, Vieweg Braunschweig, Wiesbaden, 1981

[95] Bergmann, W.: Werkstofftechnik, Teil 2: Anwendung, Hanser-Verlag, Wien, München, 1987, S. 317-363

[96] Uhlig, W: Schadenanalyse. VEB Verlag Technik, Berlin, 1. Auflage, 1986

[97] Baumann, F. K.: Das Buch der Schadensfälle: Untersuchen - Beurteilen - Vermeiden. Dr. Riederer-Verlag GmbH, Stuttgart, 2. Auflage, 1980

[98] DIN 50 900 Teile 1 - 3: Korrosion der Metalle, Begriffe. Hrsg.: Deutscher Normenausschuss, Ausg. April 1982

[99] Herro, H. M.: The Nalco guide to cooling water system failure analysis. McGraw-Hill, Inc., 1993

[100] Allianz: Handbuch der Schadenverhütung. Allianz Versicherungs-AG, München und Berlin, 2. Auflage, 1976

[101] Rahmel, A; Schwenk, W.: Korrosion und Korrosionsschutz von Stählen. Chemie, Weinheim, New York, 1. Auflage, 1977

[102] Ramme, H.: Untersuchungen zur Risseinleitung und Lebensdauer bei der Schwingungsrisskorrosion an unlegierten Stählen in wässrigen Medien, Dissertation am Institut für Werkstofftechnik an der TU Berlin

[103] Heitz, E.; Henkhaus, R; Rahmel, A: Korrosionskunde im Experiment: Untersuchungsverfahren - Messtechnik –Aussagen. Chemie, Basel, 1983

[104] Fontana, M. G.: Corrosion Engineering. McGraw-Hill, Inc., 1986

[105] Friedrich, P: Elektrochemische- und Spannungsrisskorrosionsuntersuchungen an martensitischen Cr-Ni-Stählen. Doktorarbeit an der Technischen Fakultät der Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen, 1993

[106] Schmitt-Thomas, Kh. G.: Integrierte Schadenanalyse, Springer, Berlin, Heidelberg, 1999

[107] West, J. M.: Basic Corrosion and Oxidation, Ellis Horwood Limited, Chichester, 1980

[108] Macherauch, E.: Praktikum in Werkstoffkunde: Skriptum für Ingenieure, Metall- u. Werkstoffkundler, Werkstoffwissenschaftler, Eisenhüttenleute, Fertigungs- u. Umformtechniker. Vieweg, Braunschweig Wiesbaden, 4. Auflage, 1983

[109] Ilschner, B.: Werkstoffwissenschaften: Eigenschaften, Vorgänge, Technologien. Springer, Berlin Heidelberg, 1982

[110] Herbsleb, G.: Prüfung der Beständigkeit gegen Spannungsrisskorrosion, In: Korrosionsschutz durch Information und Normung, Wulf Fischer, Verlag Irene Kuron, 1988, S. 70-94

[111] Stüwe, H.-P.: Einführung in die Werkstoffkunde. Bibliographisches Institut AG, Mannheim, 1. Auflage, 1969

[112] Mansfeld, F.: Corrosions mechanisms. Marcel Dekker, Inc., New York, 1. Auflage, 1987

[113] Hayes-Roth, F.; Waterman, D. A., Lenat, D. B.: Building, expert systems, Band 1, Addison Wesley, Amsterdam, 1983

[114] Göttert, W.: Wissensbasierte Auswahl und Auslegung von Extraktoren, Dissertation am Lehrstuhl A für Verfahrenstechnik der Technischen Universität München, 1992

[115] Puppe, F.: Problemlösungsmethoden in Expertensystemen, Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 1. Auflage, 1990

[116] Gini, G.; Sassaroli, P.: PRODE: A Shell for Industrial Diagnosis, In: Experts Systems with Applications, Vol. 8, Nr. 1, 1995, S. 67-76

[117] Harmon, P., King, D.: Expertensysteme in der Praxis, Oldenbourg Verlag, München, Wien, 3. Auflage, 1989

[118] Schlageter, G.; Stucky, W.: Datenbanksysteme: Konzepte und Modelle, Teubner Studienbücher, Stuttgart, 1983

[119] Drenth, H.; Morris A.: Prototyping expert solutions: an evaluation of Crystal, Leonardo, Guru and ART-IM. In: Expert Systems: The international journal of knowledge engineering, February 1992, Vol. 9, No. 1, S. 35-44

[120] Bleckmann, H.-G.; Löwen, U.: Vergleich von Prolog und Nexpert Object am Beispiel einer Störungsanalyse. In: KI 3/90, S. 42-48

[121] Neuron Data Elements Environment, Version 2.0, Getting Started. NEURON DATA, INC., Palo Alto, California, 1996

[122] Smart Elements, Version 2.0, Getting Started; New Features Manual. NEURON DATA, INC., Palo Alto, California, 1993

[123] Nexpert Object, Version 3.0, User's Guide. NEURON DATA, INC., Palo Alto, California, 1993

[124] Neuron Data launches Smart Elements. In: Experts Systems, November 1993, Vol. 10, No. 4, S. 26 ff

[125] Fontanive, R.: Korrosionsschäden im Maschinenbau, Diplomarbeit am Lehrstuhl für Werkstoffe im Maschinenbau, TU München, Dezember 1994

[126] März, P. F.: Bruchschäden im Maschinenbau, Semesterarbeit am Lehrstuhl für Werkstoffe im Maschinenbau, TU München, September 1994

[127] Weigert, A. J.: Bruchschäden im Maschinenbau, Semesterarbeit am Lehrstuhl für Werkstoffe im Maschinenbau, TU München, September 1994

[128] Nedeß, C.; Holst, G.: Hilfen für die statistische Versuchsplanung, Teil 1 und 2, In: QZ 37, 1992

[129] Hoffelner, W.: Expertensystem in werkstofftechnischen und werkstoffmechanischen Anwendungen. In: Swiss Materials 2 (1990), Nr. 3a, S. 16-24

[130] Gräfen, H.; Kahl, F.; Rahmel, A.: 1. Korrosionum. Verlag Chemie GmbH, Weinheim/Bergstr., 1974

[131] Schwenk, W.: Verhalten des Stahles bei chemischer Beanspruchung. Werkstoffkunde der gebräuchlichen Stähle, Teil 1. Stahleisen, Düsseldorf, 1977, S. 75-107

[132] Sedriks, A. J.: Corrosion of Stainless Steels. John Wiley & Sons, Inc., New York, 2. Auflage, 1996

[133] Gutachten der Firma IST, München

[134] Allianz: Wege zur Schadenverhütung im Maschinenbetrieb. Allianz Versicherungs-AG, München und Berlin, 1. Auflage, 1964

[135] Gespräche mit Schmitt-Thomas, Kh. G.

[136] Steiner, B.: DaCor, Konzeption und Strukturierung eines Userinterfaces und einer Wissensbank für korrosive Schäden. Diplomarbeit am Institut für Metallurgie und Metallkunde, TU München, Dezember 1986

[137] Zopf, R.: Daterm, Konzeption und Strukturierung einer Benutzeroberfläche und Wissensbank für die Analyse von thermischen Schadensfällen an metallischen Objekten. Diplomarbeit am Institut für Metallurgie und Metallkunde, TU München, März 1987

[138] Bohnsack, G.: Chloride und die Korrosion von Eisen und Stahl. Vulkan, Essen, 1984

[139] Simon, R.: IST-Gutachten, Org.-Nr.: A76.09.94, München, 1994

[140] Herbsleb, G.; Schwenk, W.: Untersuchungen über einen Lochfraßindikatortest an Chrom- und Chrom-Nickel-Stählen in chlorid- und bromidhaltigen Lösungen. In: Werkstoffe und Korrosion 18, 1967, S. 685-694

[141] Der Einfluss von Neutralsalzen auf das Korrosionsverhalten unlegierten Eisen-Werkstoffe in gut gepufferten Trinkwässern. In Werkstoffe und Korrosion 85, Chemie GmbH, Weinheim, 1985, S. 64-68

[142] Heubner, U.: Nickelwerkstoffe und hochlegierte Sonderedelstähle. expert, Ehningen bei Böblingen, 2. Auflage, 1993

[143] Glöckner, W.: Chemie. Fischer-Taschenbuch, Frankfurt am Main, 8. Auflage, 1983

[144] Dechema-Werkstoff-Tabelle. 3. Bearbeitung, VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim/Bergstraße

[145] De Renzo, D. J.: Corrosion Resistant Materials Handbook. Noyes Data Corporation, 4. Auflage, 1985

[146] Schweitzer, P. A.: Corrosion resistance tables. Marcel Dekker, Inc., New York, 1986

[147] Römpp-Chemie-Lexikon, Band 4. Hrsg.: Jürgen Falbe u. Manfred Regitz, Georg Thieme, Stuttgart, 9. Auflage, 1991

[148] Hering, E.: Physik für Ingenieure. VDI, Düsseldorf, 3. Auflage, 1989

[149] Bruns, W.: Künstliche Intelligenz in der Technik. Carl Hanser, München, Wien, 1990

[150] Baur, E.: Werkstoffinformationssysteme – nachahmenswerte Lösungen aus der Kunststofftechnik. In: VDI-Berichte Nr. 936, VDI, Düsseldorf, 1991

[151] Fähnrich, K.-P.: Ein System zur wissensbasierten Diagnose an CNC-Werkzeugmaschinen durch den Maschinenbediener, Springer, Berlin, Heidelberg, 1990

[152] Neumann, H. A.: Objekt-Orientierte Entwicklung von Software Systemen. Addison Wesley GmbH, Bonn, 1996

[153] Stadel, J.: Qualifizierung von Motormessdaten in der Kalttestprüfung. Diplomarbeit im Fachbereich Technik 2, FH Heilbronn

[154] Bärmann, F.; Gervens, T.; Renner, M; Schlagner, W.: Prognose des Korrosionsverhaltens von Werkstoffen in hochkonzentrier Schwefelsäure mit Hilfe neuronaler Netze. In: Werkstoffe und Korrosion 44, S. 467-472, VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim, 1993

[155] Corban, M; Gillar, J: Sie lernen wie ein Mensch und arbeiten zuverlässig wie eine Maschine. In: Industrieanzeiger 46/96, S. 72-76

[156] Wendler-Kalsch, E.; Gräfen, H.: Korrosionsschadenkunde, Springer, Berlin, Heidelberg, 1998

[157] Dorffner, G.: Konnektionismus. Von neuronalen Netzwerken zu einer „natürlichen“ KI, B. G. Teubner, Stuttgart,1992

[158] Löschner, J; Menzel, U.: Künstliche Intelligenz: ein Handwörterbuch für Ingenieure, VDI, Düsseldorf, 1993

11. Summary

Beside mechanical damages corrosion is the most important cause of component failures. Its economical costs reach about 4 % of the gross national product only in Germany. Therefore the task of methodical failure analysis is to avoid these damages in the future. However corrosion is a very complex subject, so there are only few experts having the knowledge to analyse failures. Because of this it has to be the aim to support others less experienced in analysing failures. The best way to do this in a simple way is to use computer assistance in form of an expert system, which provides the knowledge of a specialist to beginners or supports inexperienced experts.

So the goal of this dissertation was to develop such a system. It had to structurice the corrosion in an absolutely new way. The problem was to find a way which is also usable on computer to spread the knowledge simpler.
For that purpose two systems were built that complement each other and allow a mutual check of their results. One was based on corrosion mechanisms and the other on corrosion appearance. The first takes all parameters into consideration that influence the corrosion and the second contains all marks describing a failure.
So by comparing the stored marks and parameters with that of a new damage the cause and sort of a corrosion failure can be cleared.
For developing this system it was necessary to interview experts, to study literature and to do experiments. This strategy guarantees the practice-orientation of the resulting system.
To complete the computer aided failure analysis a database was implemented. It includes the behaviour of materials in different fluids for instance of stainless steel with and without molybdenum.

Afterwards these systems were programmed on a special shell for creating expert systems. It uses object orientation and rules in a hybrid way, so that they complement each other and allow building a realistic knowledge representation.